

中国板栗可溶性糖相关性状多样性分析

李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 王广鹏

(河北省农林科学院昌黎果树研究所, 昌黎 066600)

摘要: 为了向板栗资源挖掘、利用及优异基因定位提供数据基础和理论依据, 本研究采用 HPLC 等方法对来源我国 10 个板栗主产省市的 121 个品种(系)果实采后 17 个可溶性糖相关性状系统检测, 并进行了遗传变异分析、Shannon-weaver 指数多样性分析、主成分分析和聚类分析。结果表明: (1) 中国板栗品种可溶性糖相关性状具有丰富的多样性, 变异系数和多样性指数分别为 20.57% 和 1.89; 不同省区间板栗遗传变异和多样性存在差异, 陕西品种变异程度最大, 变异系数为 20.73%; 河北品种多样性水平最高, 多样性指数为 1.88; 安徽遗传变异和表型多样性水平都最低, 变异系数和多样性指数分别为 12.27% 和 0.97。 (2) 果实蔗糖含量、果糖含量、甘露醇含量和已测糖类的总和(蔗糖、麦芽糖、水苏糖、果糖、甘露醇和山梨醇的含量总和)在省(群体)间差异不显著, 可溶性固形物含量、可溶性总糖含量、麦芽糖占比、水苏糖含量、水苏糖占比、山梨醇含量和山梨醇占比这 7 个性状在群体间差异极显著, 且不同地域间变异丰富, 多样性程度高。 (3) 17 个性状的群体间表型分化系数为 13.04%, 群体内变异占比 86.96%, 说明板栗果实可溶性糖相关性状的变异主要来源于群体内。 (4) 主成分分析表明, 第一主成分贡献率为 30.609%, 主要特征向量为可溶性总糖含量(0.708)、蔗糖含量(0.619)、蔗糖占比(0.921)、麦芽糖占比(0.623)、水苏糖占比(0.664)、已测糖类的总和(0.647)及占比(0.951), 可以利用该因子作为板栗果实甜度和口感的综合评价指标。 (5) 聚类分析将 121 份品种(系)分为 2 个类群, 基本按地理距离而聚类。

关键词: 板栗; 种质资源; 可溶性糖; 多样性; 聚类分析

Diversity Analysis of Soluble Sugar Related Traits in Chinese Chestnut

LI Ying, ZHANG Shu-hang, GUO Yan, ZHANG Xin-fang, WANG Guang-peng

(Changli Institute of Pomology, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Changli 066600)

Abstract: To provide reference on genes exploration in chestnut, this study investigated the genetic diversity of 17 soluble sugar related traits in 121 chestnut germplasm resources collected from ten provinces in P. R. China. The contents were quantified by the HPLC method, followed by genetic variation, Shannon-weaver index diversity analysis, principal component analysis and cluster analysis. The result showed that: (1) The soluble sugar related traits in samples had abundant phenotypic diversity. The average variation coefficient and average diversity index were 20.57% and 1.89, respectively. The differences on genetic variation and genetic diversity in samples from different regions were observed. In samples from Shaanxi province, the variation degree was the highest, with the coefficient of variation of 20.73%, and the samples from Hebei province showed the highest genetic diversity, with the diversity index of 1.88. The genetic variation and diversity level in samples from Anhui province were the lowest, with the coefficient of variation and diversity index of 12.27% and 0.97, respectively. (2) Except sucrose content, fructose content, mannitol content and the sum of measured sugars (Total content of sucrose, maltose, stachyose, fructose, mannitol and sorbitol), significant differences

收稿日期: 2022-09-23 修回日期: 2022-11-22 网络出版日期: 2022-12-08

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220923001>

第一作者研究方向为板栗种质资源收集与利用, E-mail: beierdina3320@sina.com

通信作者: 王广鹏, 研究方向为板栗栽培育种, E-mail: wangguangpeng430@163.com

基金项目: 河北省重点研发计划项目(21326304D-3); 河北省自然科学基金项目(C2020301053); 河北省农林科学院科技创新专项(2022KJCXZX-CGS-3)

Foundation projects: Key R&D Project in Hebei Province(21326304D-3); Natural Science Foundation of Hebei Province(C2020301053); Special Science and Technology Innovation Project in Hebei Academy of Agriculture and Forestry (2022KJCXZX-CGS-3)

among populations in remaining traits were observed. The soluble solids content, total soluble sugar content, maltose ratio, stachyose content, stachyose ratio, sorbitol content and sorbitol ratio were extremely significant differences among populations. There were rich variations and high diversity among different regions. (3) The differentiation coefficient of 17 traits between populations was 13.41 %, and that within populations was 86.59 %, indicating that the variations on these traits was mainly attributed by intra-population diversity. (4) Principal component analysis showed that the contribution rate of the first principal component was 30.609%, severing as a comprehensive evaluation index of chestnut fruit sweetness and taste. The main feature vectors were soluble total sugar content (0.708), sucrose content (0.619), sucrose / Total soluble sugar (0.921), maltose / Total soluble sugar (0.623), stachyose / Total soluble sugar (0.664), the sum of measured sugars (0.647) and sum of measured sugars / Total soluble sugar (0.951). (5) Cluster analysis suggested 2 groups of 121 germplasm resources, being correlated with the geographical collection information.

Key words: chestnut; germplasms; soluble sugar; diversity; cluster analysis

板栗(*Castanea mollissima* Bl.)原产中国,兼具生态和经济效益,是山区荒地开发和农民增收的主要依赖树种,在我国山区乡村振兴中发挥着重要作用。糖是植物体内的主要能源物质,可溶性糖还有作为信号分子的功能^[1]。板栗果实香甜可口、营养丰富,其中可溶性糖是板栗果实的主要组成物质,其含量高低是评价果实品质优劣的主要依据之一^[2]。高可溶性糖含量历来是板栗育种者追求的一个重要目标,探明可溶性糖含量相关性状多样性和遗传特点,有助于了解其遗传稳定性和育种潜力,对发掘、利用、创新种质和实现人为调控果实中各种糖分含量具有重要指导意义。植物性状遗传特点的明确,是定向遗传改良最基本的前提。目前,关于板栗遗传规律的研究多是围绕果实、枝条、叶片和花序等表型性状进行,涉及坚果形态、刺苞轻重、枝条长短、叶片大小、花序粗细等。已有的研究成果以及评鉴出的优良或特异种质,已经在科研及育种生产中得到了有效利用^[3-11]。关于果实可溶性糖成分的研究相对较少,只有少部分品种测出板栗果实中蔗糖、葡萄糖、果糖和甘露醇几种成分的含量^[12-13]。朱灿灿等^[14]指出不同品种板栗果实中的可溶性糖含量间均存在显著差异,果实中可溶性糖积累方面已发生分化现象,可作为板栗良种选育的辅助指标。随着现阶段人们消费方式的变化,现有板栗品种并不能完全满足人们多口味的需求^[11],市场上需要不同风味、不同糖分含量的板栗品种。但目前栗实中可溶性糖遗传多样性的研究相对滞后,在其遗传基础不明确的情况下,很难有针对性的培育出风味和营养优良的品种。本研究通过对我国10个板栗主产省份121个栽培品种(系)果实可溶性糖相关17个性状的遗传多样性进行评价,可进一步丰

富中国板栗品质性状遗传多样性信息,为现有优异种质资源的挖掘、创新和育种利用提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以我国10个板栗主产省份(群体)的121个品种(系)为材料(表1),其中河北省44份,北京市10份,山东省24份,湖北省8份,湖南省9份,江苏省7份,浙江省4份,安徽省4份,广西省7份,陕西省4份。均定植于河北省昌黎果树研究所板栗种质资源圃(119°15' E, 39°72' N,属温带半湿润大陆性气候区,年平均气温11℃,无霜期186d,年平均降水量638mm)。

1.2 试验方法

所有供试品种均是2004年嫁接于3年生燕山早丰实生砧木上,每品种嫁接5株,株行距4m×4m,统一采用常规管理方法,措施一致。

2019-2021年连续3年,选取每品种生长状态基本一致的健康树体3株,于果实成熟期随机采取各单株果实1.0kg,将其置于温度 0 ± 2 ℃、相对湿度90%的气调库中贮藏,在每品种贮藏40d时,取样测定果实中可溶性糖相关性状指标,包括:含水量、可溶性总糖含量、可溶性固形物含量、蔗糖含量、蔗糖占比(蔗糖含量/可溶性总糖含量×100%)、麦芽糖含量、麦芽糖占比(麦芽糖含量/可溶性总糖含量×100%)、水苏糖含量、水苏糖占比(水苏糖含量/可溶性总糖含量×100%)、果糖含量、果糖占比(果糖含量/可溶性总糖含量×100%)、甘露醇含量、甘露醇占比(甘露醇含量/可溶性总糖含量×100%)、山梨醇含量、山梨醇占比(山梨醇含量/可溶性总糖含量×100%)、已测糖类的总和(蔗糖、麦芽糖、水苏糖、果

糖、甘露醇和山梨醇的含量总和)和已测糖类的总和占比(已测糖类总和/可溶性总糖含量×100%)。果实

成熟期确定方法、板栗果实的含水量、可溶性总糖含量按照刘庆忠^[15]方法测量。

表 1 121 份板栗种质资源编号、来源及名称

Table 1 Name, source and number of 121 resources in chestnut

序号 No.	来源 Source	名称 Name	序号 No.	来源 Source	名称 Name	序号 No.	来源 Source	名称 Name
1	河北	燕山短枝	42	河北	大录洞	83	湖北	鄂栗1号
2	河北	替码珍珠	43	河北	艾峪口	84	湖北	桂花香
3	河北	燕奎	44	河北	侯庄2号	85	湖北	罗田林科所
4	河北	早1	45	北京	黑8	86	湖北	罗田乌壳栗
5	河北	早2	46	北京	京暑红	87	湖南	双季栗
6	河北	早3	47	北京	燕昌	88	湖南	安优1号
7	河北	迁早1	48	北京	燕红	89	湖南	林场优株
8	河北	迁早2	49	北京	燕平	90	湖南	石门优株
9	河北	燕山早丰	50	北京	燕丰	91	湖南	步城优株
10	河北	西寨2号	51	北京	怀丰	92	湖南	临湘优株2号
11	河北	迁西红	52	北京	BJHW	93	湖南	桐优-33
12	河北	燕宝	53	北京	短花	94	湖南	黄花优株
13	河北	宽优1	54	北京	良乡1号	95	湖南	湖南黔栗
14	河北	燕秋	55	山东	岱岳早丰	96	江苏	青毛软刺
15	河北	兴隆大果	56	山东	黑烟青	97	江苏	沐河大袍
16	河北	青龙白杆	57	山东	徐家1号	98	江苏	焦扎
17	河北	燕金	58	山东	杂35	99	江苏	焦杂
18	河北	燕光	59	山东	早实丰	100	江苏	宜兴大红袍
19	河北	替码燕明	60	山东	烟泉	101	江苏	焦山
20	河北	燕丽	61	山东	金丰	102	江苏	焦南
21	河北	邢丰1号	62	山东	金平	103	浙江	浙早1号
22	河北	燕紫	63	山东	野杂	104	浙江	毛板红
23	河北	遵化短枝	64	山东	鲁栗2号	105	浙江	上光栗
24	河北	燕晶	65	山东	鲁栗3号	106	浙江	浙江魁栗
25	河北	硕丰	66	山东	包丰	107	安徽	粘底板
26	河北	迁西早红	67	山东	黄棚	108	安徽	大红袍
27	河北	东陵明珠	68	山东	华光	109	安徽	迟栗子
28	河北	达志沟	69	山东	烟青	110	安徽	软刺早
29	河北	燕明	70	山东	红栗	111	广西	广西玉林
30	河北	岔19	71	山东	泰栗1号	112	广西	广西油栗
31	河北	西寨1号	72	山东	新选1号	113	广西	广西14-1
32	河北	大板红	73	山东	郟城3号	114	广西	广西14-5
33	河北	燕兴	74	山东	乳山短枝	115	广西	广西14-5
34	河北	上庄52	75	山东	尖顶油栗	116	广西	广西14-6
35	河北	迁西壮栗	76	山东	双合大红袍	117	广西	融水优株
36	河北	白露	77	山东	石丰	118	陕西	长安明捡栗
37	河北	迁西暑红	78	山东	黄前中晚	119	陕西	金真晚栗
38	河北	遵化短刺	79	湖北	DL-1	120	陕西	金真栗
39	河北	大青裂	80	湖北	DL-2	121	陕西	镇巴双法
40	河北	后南峪垂枝	81	湖北	DL-3			
41	河北	何家坟5	82	湖北	DL-4			

板栗果实可溶性固形物含量测定:同株样品中每次随机挑选9粒,剥皮捣碎,挤压果汁,用手持数显糖度计(PAL-1糖度计)测定样品可溶性固形物含量,重复3次。

其他可溶性糖分含量采用HPLC-ELSD检测,每份资源重复3次。由于板栗样品中麦芽糖、水苏糖在正常检出浓度下,蔗糖浓度偏大,峰面积过载,故蔗糖、麦芽糖及水苏糖不能同时测定,需分两步

进行,果糖、甘露醇和山梨醇则需更换色谱柱后检测。具体方法如下:

样品前处理:随机取各单株坚果30粒,脱壳烘干,粉碎研磨,过120目筛,称取研磨后板栗样品2.5 g加入20%乙醇溶液50 mL,用功率160 W、频率50 kHz超声振荡器提取30 min,超声结束后补足失重,离心取上清,0.22 μm微孔滤膜过滤,得供试样品溶液。

蔗糖检测条件:使用Water 2695高效液相色谱仪,并配备奥泰E2000蒸发光散射检测器进行检测。色谱柱: COSMOSIL Sugar-D (250 mm× 4.6 mm, 5 μm); 流动相: 水(A)-乙腈(B), 梯度洗脱(0~24 min, 22% A-78% B; 25~28 min, 30% A; 29~31 min, 30% A→22% A); 流速: 1 mL/min 漂移管温度: 105 ℃; 气体流速: 2.8 L/min; 原样品溶液稀释30倍后进样10 μL, 柱温: 40 ℃。

麦芽糖和水苏糖检测条件。色谱柱: COSMOSIL Sugar-D (250 mm× 4.6 mm, 5 μm); 流动相: 水(A)-乙腈(B), 梯度洗脱(0~20 min, 18% A-82% B; 21~23 min, 18% A→30% A; 24~40 min, 30% A-70% B; 41~46 min 30% A→18% A); 流速: 1 mL/min 漂移管温度: 105 ℃; 气体流速: 2.8 L/min; 原样进样体积10 μL, 柱温: 40 ℃。

果糖、甘露醇和山梨醇检测条件。色谱柱: SUPELCOGEL Ca (30 cm×7.8 mm); 流动相: 水(A), 流速: 0.6 mL/min; 漂移管温度: 105 ℃; 气体流速: 2.8 L/min; 原样进样体积10 μL, 柱温: 65 ℃。

1.3 数据分析

参考文献[8, 10, 16]方法, Shannon's 多样性指数(H')的计算公式为: $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 。群体间表型分化系数 VST 计算公式为: $VST(\%) = [\delta 2t/S / (\delta 2t/S +$

$\delta 2S)] \times 100$ 。式中: $\delta 2t/S$ 为群体间方差分量, $\delta 2S$ 为群体内方差分量。群体内变异占比($\%$) = $100 - VST$ 。试验数据采用Excel 2010统计并计算各性状指标3年数据的平均值(X)、标准差(δ)和变异系数(CV)等, 用SPSS 20软件对数据进行巢氏分析^[8-9]、主成分分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 板栗可溶性糖相关性状多样性分析

板栗可溶性糖成分复杂, 测得的成分总和(蔗糖、麦芽糖、水苏糖、果糖、甘露醇和山梨醇的含量总和)仅占可溶性总糖的52.82%(表2)。板栗果实中各可溶性糖占比从高到低分别为蔗糖占比(44.14%)、果糖占比(4.92%)、麦芽糖占比(2.91%)、水苏糖占比(1.00%)、甘露醇占比(0.23%)、山梨醇占比(0.23%)。17个可溶性糖相关性状的平均变异系数和平均多样性指数分别为20.57%和1.89, 呈现出丰富的变异和多样性。甘露醇占比的变异系数最大, 为34.99%; 板栗果实含水量变异系数最小, 为5.83%。果糖占比和已测糖类的总和占比的多样性指数最高, 为2.05; 甘露醇含量多样性指数最低, 为1.34。

表2 中国板栗可溶性糖相关性状基本参数及多样性

Table 2 Basic parameter value and diversity of traits related soluble sugar for Chinese chestnut

性状 Trait	均值±标准差 Mean ± SD	中位数 Median	众数 Mode	极差 Rang	变异系数(%) CV	多样性指数 H'
可溶性固形物含量(%)SSC	23.36±2.76	23.17	25.60	16.37	11.80	2.00
含水量(%)WC	48.95±2.86	49.11	50.82	15.99	5.83	2.04
可溶性总糖含量(%)TSS	19.65±2.38	19.37	23.10	9.83	12.13	2.04
蔗糖含量(%)SuC	8.50±1.30	8.46	7.66	5.66	15.34	2.04
蔗糖占比(%)SuC/TSS	44.14±9.11	43.30	48.73	51.58	20.64	1.99
麦芽糖含量(%)MaIC	0.56±0.15	0.51	0.47	0.67	26.17	1.89
麦芽糖占比(%)MaIC/TSS	2.91±0.85	2.66	1.98	3.84	29.92	1.95
水苏糖含量(%)StC	0.19±0.04	0.19	0.17	0.18	18.34	2.04
水苏糖占比(%)StC/TSS	1.00±0.23	0.97	1.20	1.29	22.63	2.00
果糖含量(%)FC	0.83±0.12	0.81	0.89	0.48	13.82	2.03
果糖占比(%)FC/TSS	4.92±0.78	4.17	4.07	4.03	18.17	2.05
甘露醇含量(%)ManC	0.44±0.14	0.44	0.50	0.31	32.22	1.34
甘露醇占比(%)ManC/TSS	0.23±0.08	0.22	0.22	0.73	34.99	1.70
山梨醇含量(%)SoC	0.45±0.17	0.44	0.44	0.83	26.87	1.42
山梨醇占比(%)SoC/TSS	0.23±0.12	0.22	0.19	0.42	28.84	1.48
已测糖类的总和 SMSS	10.18±1.37	10.08	9.5	6.07	13.48	2.05
已测糖类的总和占比(%)SMSS/TSS	52.82±10.08	52.13	47.17	57.71	19.04	1.98
总均值Mean					20.57	1.89

SSC: Soluble solid content; WC: Water content; TSS: Total soluble sugar; SuC: Sucrose content; SuC/TSS: Sucrose content / Total soluble sugar; MaIC: Maltose content; MaIC/TSS: Maltose content / Total soluble sugar; StC: Stachyose content; StC/TSS: Stachyose content / Total soluble sugar; FC: Fructose content; FC/TSS: Fructose content / Total soluble sugar; ManC: Mannitol content; ManC/TSS: Mannitol content / Total soluble sugar; SoC: Sorbitol content; SoC/TSS: Sorbitol content / Total soluble sugar; SMSS: Sum of measured soluble sugar; SMSS/TSS: Sum of measured soluble sugar / Total soluble sugar; The same as below

果实含水量是所有性状中唯一变异系数低于10%、极差低于均值50%的性状,可见该性状整体离散度低,遗传稳定度高;其余16个性状的变异系数均高于10%,其中甘露醇占比最大,说明这些性状遗传变异相对较大,且甘露醇占比最能反映品种间的差异。虽然甘露醇含量、甘露醇占比、山梨醇含量和山梨醇占比4个性状的变异系数均较高,介于26.87%~34.99%之间,但多样性指数和其他性状相比却较低,介于1.34~1.70,说明甘露醇和山梨醇相关性状变异较大但分布集中。可溶性固形物含量、含水量和可溶性总糖含量这3个指标,变异系数低,最高只有12.13%,和其他性状相比多样性指数高,在2.00~2.04之间,表明这3个性状整体变异范围小,但分布分散、变异丰富。而可溶性糖组分相关的性状变异系数较高,介于13.48%~34.99%之间,表明可溶性糖组分相关的性状变异幅度差异较大。其中已测糖类的总和作为一个综合指标,其变异程

度是可溶性糖组分相关14个性状中最小的,变异系数为13.48%,但仍高于可溶性固形物含量和可溶性总糖这2个综合性指标。由此可知可溶性固形物、含水量、可溶性总糖和已测糖类的总和这种综合性指标,相较于单一指标则遗传更稳定,表现更加保守。

2.2 板栗可溶性糖相关性状在不同群体间的变异和多样性分析

不同群体样本间,板栗17个可溶性糖相关性状的变异系数和多样性指数均有明显差异(表3)。陕西群体的平均变异系数最大,为20.73%;安徽群体最小,为12.72%。山东和陕西群体中均有4个性状的变异系数在群体间最大,安徽有8个性状的变异系数在群体间最小。由此可知,就板栗17个可溶性糖相关性状整体而言,陕西群体具有较丰富的遗传变异,而安徽群体则表现出更稳定遗传的特点。就具体性状来说,陕西和山东群体拥有丰富的变异性状;安徽则有最多的遗传稳定的性状,这与整体趋势相符。

表3 不同群体板栗资源性状变异系数、多样性指数和方差分析

Table 3 Variation coefficient and diversity indexes and analysis of variance of traits of Chinese chestnut in different populations

性状 Trait	河北 Hebei			北京 Beijing			山东 Shandong			湖北 Hubei			湖南 Hunan		
	变异系 数(%) CV	多样性 指数 H'	F	变异系 数(%) CV	多样性 指数 H'	F	变异系 数(%) CV	多样性 指数 H'	F	变异系 数(%) CV	多样性 指数 H'	F	变异系 数(%) CV	多样性 指数 H'	F
	可溶性固形物含量SSC	11.11	1.84	8.09**	10.02	1.50	7.65**	9.31	1.88	2.46**	12.02	1.21	8.23**	13.83	1.15
含水量WC	6.30	1.98	10.66**	5.85	1.64	6.94**	4.10	1.87	4.34**	2.95	1.32	14.02**	5.81	1.30	8.97**
可溶性总糖含量TSS	9.70	1.95	4.35**	9.80	1.61	4.06**	14.27	1.94	11.87**	9.10	1.56	7.10**	10.39	1.74	16.14**
蔗糖含量SuC	13.78	2.06	6.62**	16.46	1.61	335.98**	17.96	1.92	419.17**	12.23	1.32	166.23**	18.98	1.68	54.15**
蔗糖占比SuC/TSS	15.80	1.96	4.29**	14.65	1.75	10.52**	27.58	1.84	48.84**	17.30	1.49	35.42**	23.86	1.21	20.50**
麦芽糖含量MaC	28.22	1.94	20.76**	16.42	1.47	263.96**	17.96	1.94	362.66**	32.39	1.39	1106.99**	25.27	1.06	752.89**
麦芽糖占比MaC/TSS	30.66	1.92	12.69**	17.65	1.89	10.25**	23.74	1.93	28.11**	40.03	1.49	226.55**	28.17	1.21	40.61**
水苏糖含量StC	20.36	1.96	13.68**	19.14	1.97	153.87**	14.65	1.76	118.27**	13.91	1.56	94.85**	20.44	1.43	4.49**
水苏糖占比StC/TSS	21.49	1.97	7.11**	21.20	1.75	22.59**	20.73	1.79	27.24**	19.42	1.73	37.70**	24.23	1.74	4.61**
果糖含量FC	12.32	2.04	7.69**	21.05	1.31	4906.72**	12.10	1.84	2411.54**	12.18	1.73	2185.21**	17.69	1.52	17.28**
果糖占比FC/TSS	16.16	1.97	6.45**	27.79	1.47	38.94**	15.35	1.97	16.74**	13.34	1.56	12.19**	16.66	1.46	13.84**
甘露醇含量ManC	20.15	1.07	5.17**	21.60	1.22	25.82**	27.05	1.48	54.86**	20.23	1.08	18.03**	25.88	1.31	104.26**
甘露醇占比ManC/TSS	18.59	2.01	5.41**	19.73	1.83	9.46**	27.25	1.91	25.59**	22.82	1.56	22.12**	27.88	1.52	40.60**
山梨醇含量SoC	21.57	1.25	7.68**	15.70	0.94	19.06**	26.69	1.43	1.14**	18.90	1.04	21.46**	21.10	1.06	35.69**
山梨醇占比SoC/TSS	23.03	2.08	5.67**	17.00	1.70	8.19**	26.20	1.98	1.27**	14.64	1.73	13.20**	17.66	1.68	33.32**
已测糖类的总和SMSS	12.52	1.96	6.67**	13.98	1.70	326.39**	15.46	1.98	410.73**	11.45	1.56	207.92**	17.28	1.68	43.52**
已测糖类的总和占比SMSS/TSS	14.90	1.98	4.27**	13.09	1.70	8.31**	25.12	1.83	40.19**	17.09	1.49	35.26**	21.94	1.21	19.04**
均值Mean	17.45	1.88	8.07	16.54	1.59	362.27	18.25	1.84	234.41	17.06	1.46	247.79	19.83	1.41	71.53

表3(续)

性状 Trait	江苏 Jiangsu			浙江 Zhejiang			安徽 Anhui			广西 Guangxi			陕西 Shaanxi		
	变异系	多样性	F	变异系	多样性	F	变异系	多样性	F	变异系	多样性	F	变异系	多样性	F
	数(%)	指数		数(%)	指数		数(%)	指数		数(%)	指数		数(%)	指数	
	CV	H'	CV	H'	CV	H'	CV	H'	CV	H'	CV	H'			
可溶性固形物含量SSC	8.89	1.28	3.52**	13.14	1.39	2.94**	3.03	1.04	0.38	10.87	1.73	4.74**	7.31	1.04	1.08*
含水量WC	4.16	1.55	38.40**	3.32	1.04	7.30**	3.80	1.04	7.312**	7.01	1.56	110.73**	3.22	1.39	23.29**
可溶性总糖含量TSS	11.53	1.55	6.54**	9.98	1.39	49.38**	9.84	1.04	4.08**	6.40	1.73	3.32**	5.16	1.39	0.49
蔗糖含量SuC	12.34	1.28	10.35**	13.63	1.04	76.90**	14.36	0.69	688.30**	14.32	1.56	130.22**	19.99	1.04	9.31**
蔗糖占比SuC/TSS	21.45	1.55	13.56**	8.37	1.04	2.11**	5.52	1.04	12.77**	17.39	1.56	26.96**	24.87	1.04	71.38**
麦芽糖含量MaIC	25.47	1.55	75.09**	7.19	1.04	0.54*	10.25	1.04	26.02**	29.46	1.49	150.96**	25.07	1.04	7.05**
麦芽糖占比MaIC/TSS	21.63	1.55	14.05**	12.15	0.69	6.93**	11.22	1.04	20.90**	34.15	1.49	45.07**	29.49	1.39	2.97**
水苏糖含量StC	18.46	1.55	69.91**	8.69	1.39	19.78**	25.22	1.04	42.98**	16.85	1.49	195.67**	15.12	1.39	108.22**
水苏糖占比StC/TSS	26.22	1.28	27.97**	18.91	1.39	100.53**	20.56	1.04	58.11**	21.80	1.73	46.54**	15.95	1.04	11.18**
果糖含量FC	15.17	1.55	11.38**	22.61	1.04	107.10**	15.99	1.04	1.65*	13.65	1.73	224.82**	6.65	1.39	2.85**
果糖占比FC/TSS	25.10	1.28	13.52**	13.55	1.39	32.68**	7.16	1.04	2.02**	15.15	1.73	32.80**	10.26	1.39	9.49**
甘露醇含量ManC	16.03	1.00	12.48**	22.53	1.04	51.92**	23.09	0.69	9.14**	20.94	0.90	0.95*	20.41	1.04	65.06**
甘露醇占比ManC/TSS	28.26	1.48	24.84**	26.18	1.39	55.28**	18.33	1.04	6.21**	19.50	1.73	0.96*	24.69	1.04	6.79**
山梨醇含量SoC	25.96	1.35	9.03**	43.40	1.04	34.93**	9.52	0.56	22.86**	15.54	0.90	19.52**	53.84	1.39	0.45
山梨醇占比SoC/TSS	28.13	1.15	12.62**	44.42	0.69	85.21**	11.89	1.39	2.05**	18.30	1.73	14.65**	49.10	1.04	0.51
已测糖类的总和SMSS	10.17	0.96	7.45**	12.49	1.04	207.21**	13.89	0.69	23.08**	12.03	1.73	98.34**	18.25	1.04	10.46**
已测糖类的总和占比SMSS/TSS	19.58	1.55	10.70**	6.87	1.04	2.59**	4.89	1.04	10.31**	15.92	1.39	22.25**	23.10	1.39	46.76**
均值Mean	18.74	1.38	21.26	16.91	1.12	49.61	12.27	0.97	55.19**	17.02	1.54	66.38	20.73	1.20	22.20

*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平下显著差异;下同

* and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively; The same as below

对不同群体板栗资源 17 个性状的多样性指数分析可知,河北群体平均多样性指数最高,为 1.88,并且有 11 个性状的多样性指数在群体间最高;山东群体平均多样性指数排第 2,有 7 个性状的多样性指数在群体间最高。安徽群体平均多样性指数最低,为 0.97,且有 15 个性状的多样性指数最低;浙江群体平均多样性指数排第 9,有 7 个性状的多样性指数最低。综合分析测定结果可发现,陕西群体变异最丰富,河北群体的性状频率分布最均匀,山东群体的板栗品种既变异丰富,性状频率分布也均匀,而安徽群体则相反,17 个性状遗传稳定且分布集中。

除安徽的可溶性固形物含量和陕西的可溶性总糖含量这两个指标外,其他所有群体的全部性状在品种(系)间的差异性都存在极显著或显著水平。北京群体内品种(系)间差异最为显著,平均 F 值为 362.27,河北群体内品种(系)间差异在 10 个群体间最低,平均 F 值为 8.07。由此结果发现,各群体内品种(系)间的变异远大于品系不同重复间的变异,其中北京群体的品种(系)内重复性最好,品种(系)间变异最大。

2.3 不同群体间板栗可溶性糖相关性状变异特征

由表 4 可知,17 个板栗可溶性糖相关性状中,除蔗糖含量、果糖含量、甘露醇含量和已测糖类的总和这 4 个性状在群体间无明显差异外,其余 13 个性状在群体间的差异均达到显著水平,其中果实可溶性固形物含量、可溶性总糖含量、麦芽糖占比、水苏糖含量、水苏糖占比、山梨醇含量和山梨醇占比这 7 个性状在群体间差异达到极显著水平,这种相同性状在不同群体差异明显的特点,说明长期的环境异质对群体表型差异有显著影响。进一步分析,可溶性固形物含量和可溶性总糖含量这 2 个综合型性状在不同群体间都具有极显著性差异,在河北、北京群体中有较高含量,使得这两个群体的板栗果实表现出更为香甜的特点。从群体所处地理位置上看,板栗品种自北向南呈现出可溶性总糖含量逐渐降低,含水量逐渐升高的变化特征。单一糖分组成相关性状中,只有水苏糖和山梨醇这两种糖的相关性状和麦芽糖占比在群体间表现出极显著性差异,说明单一的指标性状在不同地域群体间的差异明显小于多种物质影响的综合型性状。山梨醇在不同群体间差异较大,可能是其作为糖循环中的调节物质,对环境差异的影响较敏感。

表 4 不同群体间板栗可溶性糖性状多重比较
Table 4 Comparison of traits related soluble sugar for Chinese chestnut in different populations

群体	可溶性固形物含量 (%)	含水量 (%)	WC	可溶性总糖含量 (%)	蔗糖含量 (%)	SuC	SuC/TSS	麦芽糖含量 (%)	MaIC	麦芽糖占比 (%)	MaC/TSS	水苏糖含量 (%)	StC	水苏糖占比 (%)	StC/TSS
河北 Hebei	24.56 ± 2.73 c B	47.89 ± 3.02 ab A	21.10 ± 2.05 c B	8.56 ± 1.18 a A	41.10 ± 6.49 a A	0.59 ± 0.17 ab A	2.85 ± 0.87 a AB	0.19 ± 0.04 b AB	0.93 ± 0.20 ab AB						
北京 Beijing	24.74 ± 2.48 c B	47.70 ± 2.79 a A	19.88 ± 1.95 c AB	8.96 ± 1.48 a A	45.36 ± 6.65 ab A	0.52 ± 0.09 a A	2.65 ± 0.47 a A	0.19 ± 0.04 b AB	0.98 ± 0.21 abc AB						
山东 Shandong	23.28 ± 2.17 bc AB	48.33 ± 1.97 ab A	19.15 ± 2.73 abc AB	8.55 ± 1.53 a A	46.03 ± 12.70 ab A	0.52 ± 0.09 a A	2.78 ± 0.66 a A	0.19 ± 0.03 b AB	1.04 ± 0.21 bc AB						
湖北 Hubei	22.35 ± 2.69 abc AB	51.09 ± 1.51 b A	19.45 ± 1.77 abc AB	8.19 ± 1.00 a A	42.61 ± 7.37 ab A	0.54 ± 0.17 ab A	2.82 ± 1.13 a AB	0.20 ± 0.03 b B	1.04 ± 0.20 bc AB						
湖南 Hunan	22.10 ± 3.06 abc AB	50.59 ± 2.94 ab A	18.70 ± 1.94 abc AB	8.65 ± 1.64 a A	47.03 ± 11.22 ab A	0.49 ± 0.12 a A	2.67 ± 0.75 a A	0.19 ± 0.04 b AB	1.04 ± 0.25 bc AB						
江苏 Jiangsu	22.27 ± 1.98 abc AB	50.54 ± 2.10 ab A	17.16 ± 1.98 a A	8.52 ± 1.05 a A	50.83 ± 10.91 ab A	0.69 ± 0.18 b A	4.06 ± 0.88 b B	0.20 ± 0.04 b AB	1.17 ± 0.31 bc B						
浙江 Zhejiang	23.04 ± 3.03 abc AB	50.53 ± 1.67 ab A	17.07 ± 1.70 a A	9.06 ± 1.23 a A	53.07 ± 4.44 b A	0.51 ± 0.04 a A	3.03 ± 0.37 a AB	0.21 ± 0.02 b B	1.24 ± 0.23 c B						
安徽 Anhui	21.48 ± 0.65 ab AB	49.70 ± 1.89 ab A	18.58 ± 1.83 abc AB	8.68 ± 1.25 a A	46.69 ± 2.58 ab A	0.51 ± 0.05 a A	2.76 ± 0.31 a A	0.14 ± 0.04 a A	0.75 ± 0.15 a A						
广西 Guangxi	20.20 ± 2.20 a A	51.04 ± 3.58 b A	18.45 ± 1.18 ab AB	7.59 ± 1.09 a A	41.45 ± 7.21 a A	0.60 ± 0.18 ab A	3.33 ± 1.14 ab AB	0.19 ± 0.03 b AB	1.01 ± 0.22 bc AB						
陕西 Shaanxi	22.23 ± 1.62 abc AB	50.35 ± 1.62 ab A	18.82 ± 0.97 abc AB	7.88 ± 1.58 a A	42.36 ± 10.54 ab A	0.51 ± 0.13 a A	2.76 ± 0.81 a A	0.20 ± 0.03 b AB	1.05 ± 0.17 bc AB						

群体	果糖含量 (%)	FC	FC/TSS	果糖占比 (%)	甘露醇含量 (%)	ManC	甘露醇占比 (%)	ManC/TSS	山梨醇含量 (%)	SoC	山梨醇占比 (%)	SoC/TSS	已测糖类的总和 (%)	SMSS	SMSS/TSS
河北 Hebei	0.84 ± 0.10 a A	4.02 ± 0.65 a A	0.42 ± 0.09 a A	0.20 ± 0.04 a A	0.41 ± 0.08 a AB	0.19 ± 0.04 a A	10.26 ± 1.28 a A	49.30 ± 7.34 a A							
北京 Beijing	0.79 ± 0.17 a A	4.04 ± 1.12 a A	0.45 ± 0.08 a A	0.23 ± 0.05 ab A	0.44 ± 0.06 a AB	0.23 ± 0.04 ab ABC	10.55 ± 1.47 a A	53.48 ± 7.00 ab A							
山东 Shandong	0.83 ± 0.10 a A	4.41 ± 0.68 ab A	0.44 ± 0.11 a A	0.23 ± 0.06 ab A	0.53 ± 0.05 ab AB	0.25 ± 0.07 abc ABC	10.19 ± 1.58 a A	54.78 ± 13.76 ab A							
湖北 Hubei	0.84 ± 0.10 a A	4.37 ± 0.58 ab A	0.42 ± 0.07 a A	0.22 ± 0.05 ab A	0.39 ± 0.06 a AB	0.21 ± 0.03 ab AB	9.85 ± 1.13 a A	51.27 ± 8.76 ab A							
湖南 Hunan	0.83 ± 0.15 a A	4.45 ± 0.74 ab A	0.44 ± 0.11 a A	0.24 ± 0.07 ab A	0.38 ± 0.07 a A	0.21 ± 0.04 ab AB	10.24 ± 1.77 a A	55.64 ± 12.21 ab A							
江苏 Jiangsu	0.85 ± 0.13 a A	5.07 ± 1.27 b A	0.48 ± 0.09 a A	0.28 ± 0.08 b A	0.44 ± 0.13 a AB	0.26 ± 0.07 abc ABC	10.34 ± 1.05 a A	61.66 ± 12.07 b A							
浙江 Zhejiang	0.78 ± 0.18 a A	4.56 ± 0.62 ab A	0.44 ± 0.11 a A	0.24 ± 0.06 ab A	0.48 ± 0.15 ab AB	0.30 ± 0.13 c BC	10.65 ± 1.33 a A	62.44 ± 4.29 b A							
安徽 Anhui	0.85 ± 0.14 a A	4.57 ± 0.33 ab A	0.46 ± 0.12 a A	0.26 ± 0.05 ab A	0.50 ± 0.06 ab AB	0.27 ± 0.03 bc ABC	10.28 ± 1.43 a A	55.30 ± 2.71 ab A							
广西 Guangxi	0.89 ± 0.12 a A	4.84 ± 0.73 ab A	0.42 ± 0.08 a A	0.23 ± 0.04 ab A	0.40 ± 0.06 a AB	0.23 ± 0.04 ab ABC	9.37 ± 1.13 a A	51.17 ± 8.14 ab A							
陕西 Shaanxi	0.86 ± 0.06 a A	4.61 ± 0.47 ab A	0.43 ± 0.06 a A	0.21 ± 0.05 a A	0.57 ± 0.25 b B	0.31 ± 0.15 c C	9.54 ± 1.74 a A	51.31 ± 11.85 ab A							

大小写字母分别表示不同群体间 1% 和 5% 水平差异显著, 下同
The capital and lowercase letters indicate significant differences at the 0.01 and 0.05 level probability, the same as below

由表5可知,除山梨醇相关性状外,其他15个性状在群体内均存在极显著差异,F值介于1.68~28.52之间。17个性状群体间F值介于0.46~4.71之间。按系统分组设计方差分量比组成计算出各方差分量占总变异的比例,在板栗各可溶性糖相关性状中,各性状群体遗传组成均有较大差异,方差分量百分比在群体间和群体内的范围分别是3.25%~

21.65%和27.79%~82.74%。17个性状群体间的平均方差分量占总变异的9.34%,群体内的方差分量占总变异的64.34%。群体间17个表型性状的表型分化系数(V_{st})值介于3.80%~28.38%之间,平均为13.04%,即群体间的平均变异远低于群体内,表明板栗的这17个性状群体内变异是性状变异的主要来源。

表5 板栗可溶性糖性状方差分析结果和表型分化系数

Table 5 Differentiation coefficient and variance analysis of quantitative traits of chestnut soluble sugar

性状 Trait	方差分量 Variance component			方差分量百分比 Variance component percentage		群体间表型分 化系数(%) Phenotype differentiation coefficient V_{ST} among populations	F	
	群体间 Among populations	群体内 Within populations	随机误差 Random errors	群体间 Among populations	群体内 Within populations		群体间 Among populations	群体内 Within populations
	可溶性固形物含量 SSC	773.95	2188.69	1119.20	18.96		53.62	26.12
含水量 WC	6.51	24.90	6.21	17.30	66.19	20.73	3.12**	10.14**
可溶性总糖含量 TSS	6.42	16.20	7.03	21.65	54.64	28.38	4.71**	5.86**
蔗糖含量 SuC	33.88	589.05	95.07	4.72	82.04	5.44	0.685	15.57**
蔗糖占比 SuC/TSS	3343.69	27527.51	5668.65	9.15	75.34	10.83	1.49	12.21**
麦芽糖含量 MalC	0.90	7.48	0.66	10.00	82.74	10.74	1.43	28.52**
麦芽糖占比 MalC/TSS	30.70	247.92	41.74	9.58	77.39	11.02	1.48	14.93**
水苏糖含量 StC	4.31	44.83	6.84	7.70	80.08	8.77	1.15	16.47**
水苏糖占比 StC/TSS	2.26	16.79	3.82	9.88	73.42	11.86	1.61	11.06**
果糖含量 FC	0.19	4.81	0.84	3.25	82.36	3.80	0.46	14.45**
果糖占比 FC/TSS	32.98	203.26	47.45	11.63	71.65	13.96	1.93	10.77**
甘露醇含量 ManC	0.53	6.25	9.35	3.29	38.75	7.83	1.02	1.68**
甘露醇占比 ManC/TSS	0.34	2.02	2.82	6.56	39.00	14.41	2.04*	1.79**
山梨醇含量 SoC	1.91	9.87	23.54	5.41	27.79	16.30	2.38*	1.06
山梨醇占比 SoC/TSS	0.79	4.35	8.02	6.00	33.05	15.37	2.21*	1.36
已测糖类的总和 SMSS	31.46	659.08	112.60	3.92	82.06	4.56	0.568	14.71**
已测糖类的总和占比 SMSS/TSS	4448.10	33564.48	7559.80	9.77	73.65	11.70	1.58	11.16**
平均值 Mean				9.34	64.34	13.04		
群体内平均变异占比(%)						86.96		

2.4 板栗果实可溶性糖含量相关性状主成分和聚类分析

以特征值大于1.0为标准提取主成分。由表6可知,果实可溶性糖含量相关性状中前7个主成分的特征值均大于1,说明这7个主成分在板栗可溶性糖变异性构成中作用较大,累计反映了总信息量的92.004%,其中可溶性固形物含量(0.626)、可溶性总糖含量(0.708)、蔗糖含量(0.619)、蔗糖占比(0.921)、麦芽糖占比(0.623)、水苏糖占比(0.664)、果糖含量(0.657)、山梨醇含量(0.622)、已测糖类的总和(0.647)及占比(0.951)这10个性状的特征向量都在0.6以上,认为其是造成板栗可溶性糖变异的

主要因素。10个性状中可溶性固形物含量、可溶性总糖含量、蔗糖占比、麦芽糖占比、水苏糖占比、已测糖类的总和及占比这7个性状都不是单一的指标性状,都有多种糖类的参与,并且载荷值最高的两个性状蔗糖占比和已测糖类总和占比都在其中,说明板栗可溶性糖变异的主要来源为各可溶性糖的综合指标,这一现象与板栗资源可溶性糖相关性状在长期应对不同外界环境和进化中,在地域差异下表现的结果相吻合。

采用系统聚类法,对10个群体板栗品种采用组间连接法基于欧式距离进行聚类。由图1可知,在欧氏距离20时10个板栗群体根据可溶性糖相关性

状可以分为2个类群:湖北、陕西、山东、北京和河北群体聚为一类,其中湖北、陕西和山东群体先聚为一类,陕西和山东纬度接近,温度环境相似,陕西和湖北有面积接壤,群体性状表现相似,之后和北京、河北群体聚为一类,除湖北外,其余群体都地处我国北方地区,此类群整体表现为可溶性固形物含量高,糖度高,含水量低。第Ⅱ类为江苏、浙

江、湖南、安徽和广西群体,其中江苏和浙江群体先聚为一类,这两个群体地理位置相接,环境相似,湖南、安徽群体先聚为一类,最后两者和广西群体聚为一类,广西群体位于所有群体的西南端,所以在最后聚入,这5个群体都地处我国南方地区,这类群整体表现为可溶性固形物含量低,糖度低,含水量高。

表6 板栗可溶性糖相关性状的主成分矩阵、特征向量和贡献率

Table 6 The eigenvalue and contributive percentage of principal components and component scores coefficient matrix of soluble sugar traits for Chinese chestnut

性状 Trait	主成分 Principal component						
	1	2	3	4	5	6	7
可溶性固形物含量 SSC	-0.210	0.418	0.626	0.182	0.207	-0.200	0.365
含水量 WC	0.190	-0.302	-0.547	-0.215	-0.216	0.380	-0.439
可溶性总糖含量 TSS	-0.708	0.483	0.055	0.143	0.157	0.325	-0.048
蔗糖含量 SuC	0.619	0.638	0.291	-0.007	0.025	0.253	-0.236
蔗糖占比 SuC/TSS	0.921	0.178	0.201	-0.056	-0.079	0.000	-0.152
麦芽糖含量 MaC	0.358	0.491	-0.505	-0.066	-0.234	0.087	0.502
麦芽糖占比 MaC/TSS	0.623	0.229	-0.482	-0.099	-0.275	-0.059	0.478
水苏糖含量 SiC	0.304	0.228	-0.372	0.485	0.508	-0.294	-0.195
水苏糖占比 SiC/TSS	0.664	-0.077	-0.348	0.346	0.328	-0.419	-0.138
果糖含量 FC	0.089	-0.138	0.097	-0.633	0.657	0.214	0.149
果糖占比 FC/TSS	0.551	-0.429	0.046	-0.556	0.407	-0.047	0.169
甘露醇含量 ManC	0.211	-0.355	0.047	0.598	0.204	0.594	0.247
甘露醇占比 ManC/TSS	0.554	-0.545	0.012	0.446	0.096	0.316	0.185
山梨醇含量 SoC	0.307	-0.265	0.622	0.077	-0.292	-0.037	0.004
山梨醇占比 SoC/TSS	0.511	-0.495	0.414	0.058	-0.276	-0.202	0.016
已测糖类的总和 SMSS	0.647	0.648	0.227	-0.051	0.064	0.264	-0.161
已测糖类的总和占比 SMSS/TSS	0.951	0.139	0.141	-0.092	-0.058	-0.017	-0.085
特征值 Eigenvalue	50.203	20.670	20.210	10.759	10.433	10.240	10.124
贡献率(%)Contributive percentage	30.609	15.706	13.000	10.348	8.432	7.297	6.612
累计贡献率(%)Cumulative contributive percentage	30.609	46.314	59.315	69.663	78.095	85.392	92.004

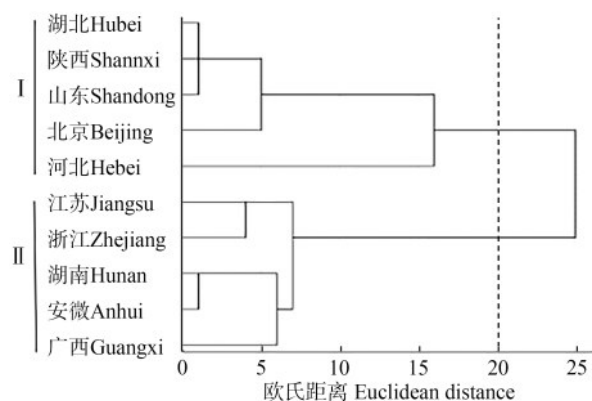


图1 板栗群体聚类图

Fig.1 Cluster of chestnut populations

3 讨论

板栗果实中可溶性糖含量的差异对其营养和

口感有重大影响^[17-18],是衡量果实品质的主要指标^[2]。市场上需要不同风味甜度的板栗品种,但现有品种并不能满足人们多口味的需求^[12]。本研究从全国10个板栗主产省份(群体)中选取121个地方主栽品种(系)开展可溶性糖相关性状研究,这10个省份涵盖了我国板栗全部5个地方品种群(华北品种群、长江中下游品种群、西北品种群、东南品种群、西南品种群)^[19],试验样本选取有较强的代表性,利于整体趋势分析,可更准确的探明遗传变异规律。板栗可溶性糖成分复杂,HPLC检测时有些成分尚未明确,已测得的可溶性糖组成成分仅占可溶性总糖的52.82%,其中蔗糖含量最高。板栗17个可溶性糖相关性状的变异系数和遗传多样性指数差异较大,呈现出丰富的变异和多样性。进一步研究发现,在中国不同省份的板栗品种间,各个可溶

性糖组分差异均较大,尤其作为糖代谢底物的山梨醇^[20],含量差异大,而可溶性固形物、含水量、可溶性总糖和已测糖类的总和这类综合性指标,相较于单一指标则表现更加保守,由此推断多个单一指标间应存在互相影响协作,并最终维持整体可溶性糖含量的相对稳定。如蔗糖的无效循环系统中,葡萄糖和果糖可合成蔗糖,并在一定的信号调节下没有代谢掉的蔗糖在液泡中再次转化成果糖和葡萄糖^[21-22],同时这也解释了为什么各品种间甜度相似的板栗果实却有着不同层次和风味的香甜口感。

从群体上看,板栗品种果实自北向南呈现出甜度逐渐降低,含水量逐渐升高的变化特征,不同地理来源的板栗品种大部分可溶性糖相关性状差异明显,这一结果与江锡兵等^[8]、李颖等^[10]的研究相似,说明不同的地域环境可导致群体性状的明显差异,由此推断地理和气象特征、栽培条件、自然竞争和人工选择,是特定适应性地方板栗群体形成的共同因子。从各群体性状的差异表现可以看出,单一指标中除了山梨醇作为糖循环中的调节物质,对环境差异的影响较敏感外,其他单一的指标性状在不同地域群体间的差异明显小于综合型的性状,由此认为板栗可溶性糖相关性状在长期的对外界不同环境的应对和进化中,更多是多种物质共同衍化的结果,而非某单一糖类的主要改变。本研究中,各群体间各性状变异系数和多样性程度有显著差异,同一群体不同性状的差异程度亦不相同。本研究发现,品系间的变异是群体内变异的主要来源,群体内的变异反映的是种质资源个体基因型间的变异^[11],种质资源中丰富的可溶性糖含量、组成及比例的基因型是改良和选育品质高端、风味优异板栗品种的基础,因此研究种质资源个体基因型间(不同品种间)的性状变异是提高育种效率的根本^[23]。本研究中17个性状的群体间平均表型分化系数(VST)为13.04%,群体内为86.96%,说明群体内变异远高于群体间变异,这与聂兴华等^[24]、田华等^[25]和张馨方等^[26]栗属植物遗传多样性分析结果一致。因此,在以板栗果实可溶性糖相关性状作为评价指标或筛选目标进行板栗品种改良或选育时,应该以群体资源的表现为辅,研究重点放到广泛的基因型筛查利用上。主成分分析可简化分析过程,更好地描述总变异构成特征^[27-28]。本研究中,前7个主成分的累积贡献率为92.004%,其中第1主成分贡献率为30.609%,远高于其他主成分,其主要反映可溶性总糖含量及各可溶性糖组分占比,可以利用该因

子作为板栗果实甜度和口感的综合评价指标。

植物对气候及环境的适应能力会导致其性状表现出不同的地理变异规律,本研究中,板栗群体可溶性糖性状特征基本上按地理距离而聚类,揭示了群体间该类性状变异的连续性。本研究结果与依据叶片、坚果性状和枝条性状等表型特征对中国板栗群体的聚类分析^[8-9,11]有一定相似性。聚为一类的板栗群体,或相近或毗邻,可能是通过多年的品种交换和进化过程中调控可溶性糖含量基因之间的相互渗透,最后导致遗传组成的趋同^[29]。随着纬度的升高(由南向北),气温降低和降雨量减少,板栗果实中可溶糖度升高,含水量低,这可能与细胞内可溶性糖的抗性作用有关,因为蔗糖、果糖、葡萄糖等也是重要的信号分子,在调节植物代谢过程和防御反应中起重要作用^[22],可溶性糖含量升高有助于抗寒性的增强,同时还具有保护蛋白质避免低温所引起的凝固作用^[30-31]。根据上述研究结果,推测北方板栗类群可溶性糖含量高于南方的原因可能是为了对抗北方干燥寒冷的环境,是一种长期自然进化的结果。另外,在南方大类群中,湖南、广西群体,未先按地理距离而聚类的情况,可能是由于这些群体中的品种长期引种驯化、吸纳外来基因,导致与原产地的性状表现有所不同,或者这些群体的本来原有的种质遗传变异较大,与其他群体在遗传关系上较远等原因。

农艺性状的鉴定评价是研究种质资源最基本方法和有效途径,利用资源的综合评价指导育种,成功提高了育种效率^[32-34]。表型鉴定已进入新阶段,已成为育种中重要性状准确快速发掘与应用的坚实基础^[35]。精确控制可溶性糖含量一直是板栗育种的重要目标,精准的选择杂交亲本来实现板栗果实品质的遗传改良,定位可溶性糖合成与转化基因,充分挖掘板栗可溶性糖数据和分析性状遗传多样性信息将有助于推动这一目标的实现。

参考文献

- [1] Tang Y, Ren J, Liu C X, Jiang J B, Yang H H, Li J F. Genetic characteristics and QTL analysis of the soluble sugar content in ripe tomato fruits. *Scientia Horticulturae*, 2021, 276: 109784-109785
- [2] 孔德军,刘庆香,王广鹏,封新国,侯聚敏,柳鉴,秦岭,席兴军. GB/T 22346-2008 板栗质量等级. 北京:国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会, 2009
Kong D J, Liu Q X, Wang G P, Feng X G, Hou J M, Liu L, Qin L, Xi X J. GB/T 22346-2008 quality grade of Chinese

- chestnut. Beijing: General Administration of Quality Super, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2009
- [3] 马玉敏, 陈学森, 何天明, 吴传金, 王娜. 中国板栗3个野生居群部分表型性状的遗传多样性. 园艺学报, 2008, 35(12): 1717-1726
Ma Y M, Chen X S, He T M, Wu C J, Wang N. Genetic diversity of morphological traits in wild populations of *Castanea mollissima* Blume. Acta Horticulturae Sinica, 2008, 35(12): 1717-1726
- [4] 王广鹏, 孔德军, 刘庆香. 板栗杂交后代3个重要经济性状的遗传特点. 华北农学报, 2009, 24(增刊): 102-104
Wang G P, Kong D J, Liu Q X. Inheritance characters of three economic characteristics of crossed chestnut progeny. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(S): 102-104
- [5] 周连第. 板栗种质资源遗传多样性研究. 北京: 中国农业大学, 2005
Zhou L D. Study on genetic diversity of germplasm resources in *Castanea mollissima*. Beijing: China Agricultural University, 2005
- [6] 刘国彬, 兰彦平, 姚研武, 兰卫宗, 王金宝, 刘建玲. 板栗杂交后代坚果表型性状的遗传变异. 华北农学报, 2011, 26(5): 117-121
Liu G B, Lan Y P, Yan Y W, Lan W Z, Wang J B, Liu J L. Genetic variation of nut morphological traits in crossed chestnut progenies. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(5): 117-121
- [7] 刘国彬, 兰彦平, 兰卫宗, 曹均. 板栗农家品种资源坚果表型性状分析. 江西农业大学学报, 2013, 35(5): 977-981, 987
Liu G B, Lan Y P, Lan W Z, Cao J. An analysis of phenotypic traits of native chestnut varieties. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(5): 977-981, 987
- [8] 江锡兵, 龚榜初, 刘庆忠, 陈新, 吴开云, 邓全恩, 汤丹. 中国板栗地方品种重要农艺性状的表型多样性. 园艺学报, 2014, 41(4): 641-652
Jiang X B, Gong B C, Liu Q Z, Chen X, Wu K Y, Deng Q E, Tang D. Phenotypic diversity of important agronomic traits of local cultivars of Chinese chestnut. Acta Horticulturae Sinica, 2014, 41(4): 641-652
- [9] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 闫希光, 王广鹏. 中国板栗9个结果母枝相关表型性状的遗传多样性研究. 园艺学报, 2019, 46(3): 453-463
Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Yan X G, Wang G P. Genetic diversity analysis of several phenotypic traits related to biennial bearing branch in Chinese chestnut. Acta Horticulturae Sinica, 2019, 46(3): 453-463
- [10] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 王广鹏. 211份板栗种质资源花序表型多样性和聚类分析. 中国农业科学, 2020, 55(22): 4667-4682
Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Wang G P. Catkin phenotypic diversity and cluster analysis of 211 Chinese chestnut germplasms. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 55(22): 4667-4682
- [11] 郭燕, 张树航, 李颖, 张馨方, 王广鹏. 中国板栗36个叶片表型性状的多样性. 中国农业科学, 2022, 55(22): 991-1009
Guo Y, Zhang S H, Li Y, Zhang X F, Wang G P. Diversity analysis of 36 leaf phenotypic traits of Chinese chestnut. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(22): 991-1009
- [12] 刘艳, 柳文祥, 王金金, 刘帅, 陈双双, 杨柳, 曹庆芹, 秦岭. 炒食板栗品种营养品质评价及糖组分分析. 北京农学院学报, 2013, 4(28): 21-24
Liu Y, Liu W X, Wang J J, Liu S, Chen S S, Yang L, Cao Q Q, Qing L. The evaluation of nutrition quality and the analysis of sugar components in fried chestnut varieties (*Castanea mollissima*). Journal of Beijing University of Agriculture, 2013, 4(28): 21-24
- [13] 刘旺, 彭映辉, 谢沛源, 陈景震, 姚辉, 全新. 5个板栗品种果实发育及糖含量动态变化研究. 中国果树, 2021(6): 44-49
Liu W, Peng Y H, Xie P Y, Chen J Z, Yao H, Quan X. Studies on dynamic changes of fruit development and sugar content of five Chinese chestnut varieties. China Fruits, 2021(6): 44-49
- [14] 朱灿灿, 姬付勇, 耿国民. 不同板栗品种(单株)果实重要农艺性状的模糊综合评价. 经济林研究, 2017, 35(4): 13-21
Zhu C C, Ji F Y, Geng G M. Fuzzy comprehensive evaluation on important agronomic characteristics of Chinese chestnut cultivars. Nonwood Forest Research, 2017, 35(4): 13-21
- [15] 刘庆忠. 板栗种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006
Liu Q Z. Descriptors and data standard for chestnut (*Castanea mollissima* Blume). Beijing: China Agriculture Press, 2006
- [16] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 3-14
- [17] 阚黎娜. 我国六个产地板栗质量差别及热加工对其品质的影响. 北京: 北京林业大学, 2018
Kan L N. Quality differentiation of chestnuts from 6 different origins of China and effect of thermal processing on their quality. Beijing: Beijing Forestry University, 2018
- [18] Li Q, Shi X H, Zhao Q J. Effect of cooking methods on nutritional quality and volatile compounds of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Bl.). Food Chemistry, 2016, 201: 80-86
- [19] 张宇和, 柳彦, 梁维坚, 张育明. 中国果树志·板栗卷. 北京: 中国林业出版社, 2005
Zhang Y H, Liu L, Liang W J, Zhang Y M. Fruit trees of China · chestnut. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005
- [20] 潘俨. 库尔勒香梨果实发育及采后糖代谢与呼吸代谢关系的研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016
Pan Y. The relationship between sugar metabolism and respiratory metabolism throughout fruit development and postharvest of Korla fragrant pear (*Pyrus sinkiangensis* Yu).

- Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016
- [21] Nguyen B, Foyer C H. A role for 'futile cycles' involving invertase and sucrose synthase in sucrose metabolism of tomato fruit. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(358):881-889
- [22] Chen T, Zhang Z Q, Li B Q, Qin G Z, Tian S P. Molecular basis for optimizing sugar metabolism and transport during fruit development. *Abiotech*, 2021, 2:330-340
- [23] 张云跃, 马常耕, 林睦就, 李柏海. 我国银杏遗传变异研究之一: 种核性状的群体间和群体内变异. *林业科学*, 2001, 37(4): 35-40
- Zhang Y Y, Ma C G, Lin M J, Li B H. Study on one of genetic variations for ginkgo biloba in China the variation of breeding fruit-stone characters among and within population. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 35-40
- [24] 聂兴华, 郑瑞杰, 赵永廉, 曹庆芹, 秦岭, 邢宇. 利用荧光 SSR 分子标记评估中国栗属植物遗传多样性. *中国农业科学*, 2021, 54(8): 1739-1750
- Nie X H, Zheng R J, Zhao Y L, Cao Q Q, Qin L, Xing Y. Genetic diversity evaluation of *Castanea* in China based on fluorescently labeled SSR. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(8): 1739-1750
- [25] 田华, 康明, 李丽, 姚小洪, 黄宏文. 中国板栗自然居群微卫星(SSR)遗传多样性. *生物多样性*, 2009, 17(3): 296-302
- Tian H, Kang M, Li L, Yao X H, Huang H W. Genetic diversity in natural populations of *Castanea mollissima* inferred from nuclear SSR markers. *Biodiversity Science*, 2009, 17(3): 296-302
- [26] 张馨方, 张树航, 李颖, 郭燕, 王广鹏. 基于 SSR 标记的板栗种质资源遗传多样性分析. *分子植物育种*, 2020, 18(15): 5164-5175
- Zhang X F, Zhang S H, Li Y, Guo Y, Wang G P. Genetic diversity analysis of *Castanea mollissima* germplasm resources based on SSR markers. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(15): 5164-5175
- [27] 韩海波, 师文贵, 王晓娜, 内蒙古扁蓊豆野生资源形态特征研究. *植物遗传资源学报*, 2011, 12(5): 721-726
- Han H B, Shi W G, Wang X N. Analysis of flower character variation of medicago ruthenica in Inner Mongolia. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2011, 12(5): 721-726
- [28] 张莹, 曹玉芬, 霍宏亮, 徐家玉, 田路明, 董星光, 齐丹, 张小双, 刘超, 王立东. 基于枝条和叶片表型性状的梨种质资源多样性. *中国农业科学*, 2018, 51(17): 3353-3369
- Zhang Y, Cao Y F, Huo H L, Xu J Y, Tian L M, Dong X G, Qi D, Zhang X S, Liu C, Wang L D. Diversity of pear germplasm resources based on twig and leaf phenotypic traits. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(17): 3353-3369
- [29] 兰彦平, 周连第, 姚研武, 王尚德, 刘国彬. 中国板栗种质资源的 AFLP 分析. *园艺学报*, 2010, 37(9): 1499-1506
- Lan Y P, Zhou L D, Yao Y W, Wang S D, Liu G B. Analysis of *Castanea mollissima* germplasm resources by AFLP. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(9): 1499-1506
- [30] 张敏, 蔡瑞国, 贾秀领, 王文颇, 王岩岩. 小麦抗寒机制的研究进展. *东北农业科学*, 2016, 41(4): 37-42
- Zhang M, Cai R G, Jia X L, Wang W P, Wang Y Y. Research progress on physiological mechanism of cold resistance of wheat. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2016, 41(4): 37-42
- [31] 程量, 林良斌. 作物耐旱性生理指标研究进展. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 27-31
- Cheng L, Lin L B. The research progress of physiological and biochemical indexes about drought tolerance in crop. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(3): 27-31
- [32] Szamosi C, Solmaz I, Sari N. Morphological evaluation and comparison of Hungarian and Turkish melon (*Cucumis melo* L.) germplasm. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124: 170-182
- [33] 胡建斌, 马双武, 李建吾. 国外甜瓜种质资源形态性状遗传多样性分析. *植物学报*, 2013, 48(1): 42-51
- Hu J B, Ma S W, Li J W. Genetic diversity of foreign melon (*Cucumis melo*) germplasm resources by morphological characters. *Chinese Bulletin of Botany*, 2013, 48(1): 42-51
- [34] 王海飞, 关建平, 孙雪莲. 世界蚕豆种质资源遗传多样性和相似性的 ISSR 分析. *中国农业科学*, 2011, 44(5): 1056-1062
- Wang H F, Guan J P, Sun X L. Genetic diversity and similarity of global faba bean (*Vicia faba* L.) germplasm revealed by ISSR markers. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(5): 1056-1062
- [35] 王晓鸣, 邱丽娟, 景蕊莲, 任贵兴, 李英慧, 李春辉, 秦培友, 谷勇哲, 李龙. 作物种质资源表型性状鉴定评价: 现状与趋势. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(1): 12-20
- Wang X M, Qiu L J, Jing R L, Ren G X, Li Y H, Li C H, Qin P Y, Gu Y Z, Li L. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: Status and development. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1): 12-20