

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.002

板栗坚果营养物质和抗氧化成分综合评价

武妍妍¹, 史文石², 石新如¹, 陈荣荣¹, 赵悦¹, 赵佳冰¹,
江泽平³, 王志伟⁴, 史胜青^{1*}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091;
2. 中国林业科学研究院成果转化与产业开发处, 北京 100091; 3. 中国林业科学研究院森林生态环境与
自然保护研究所, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091; 4. 河北省秦皇岛市青龙满族
自治县娄杖子镇小鹿沟村, 河北 秦皇岛 066508)

摘要: [目的] 探讨抗氧化酶作为种质评价指标的可行性, 完善板栗优良种质资源评价体系。[方法] 在河北省燕山地区收集 18 份板栗 (*Castanea mollissima*) 种质, 测定外观特征、营养物质及抗氧化成分 (4 种酶指标: 超氧化物歧化酶 (SOD)、多酚氧化酶 (PPO)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和 3 种非酶指标: 总多酚、总黄酮和维生素 C), 并在有或无抗氧化酶时进行基于隶属函数-因子分析相结合的综合评价, 筛选优良种质资源。[结果] 18 份板栗种质单果鲜质量 TPZ 的最大 (12.51 g), QTC 的最小 (7.88 g), 平均为 9.65 g; 含水量 TPZ 的最高 (51.59%), LJT 的最低 (45.95%), 平均为 48.85%; 淀粉含量 LJT 的最高 (53.69%), JCY-1 最低 (38.28%), 平均为 46.81%; 可溶性糖含量 ZQ1 的最高 (11.62%), YHZ 的最低 (4.51%), 平均为 7.96%; SOD 活性 TPZ 的最高 (1 310.42 U·g⁻¹), ZQ1 的最低 (717.40 U·g⁻¹), 平均为 1 012.37 U·g⁻¹; POD 活性 JIH 的最高 (5 965.33 U·g⁻¹), JCY-3 的最低 (3 009.33 U·g⁻¹), 平均为 4 168.67 U·g⁻¹。[结论] 根据有或无 4 种抗氧化酶, 现有 4 份栽培品种综合得分排名都是: QX107>QL3113>QX3113>HHZ20。除 3 个良种外, ZJ2 和 ZQ1 可作为候选优良种质深入挖掘; 抗氧化指标 SOD、POD、CAT 和 PPO 可考虑作为板栗种质评价的指标。

关键词: 板栗; 营养物质; 抗氧化酶; 因子分析; 综合评价

中图分类号: S664.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0012-11

板栗 (*Castanea mollissima* Bl.) 是壳斗科 (Fagaceae) 栗属 (*Castanea* Mill.) 经济林树种, 不仅提供品质优良的坚果, 还是重要的生态恢复树种^[1-3]。板栗坚果营养丰富, 以淀粉为主, 同时还含有丰富的可溶性糖、蛋白质、粗脂肪、维生素 C 及黄酮类化合物, 有“木本粮食”的美称^[4-5]。

营养品质评价是优良种质资源选育的重要步骤, 目前在种质资源收集与评价方面开展了大量工作, 如利用等距分级评价法^[6]、模糊数学法^[7]、方差分析与相关分析结合法^[8]、因子分析与隶属函数

结合法^[9]等对河北省燕山地区和山东省的板栗种质或主要品种从表型和营养成分等方面进行了比较研究, 包括单粒鲜质量、含水量、淀粉、直链淀粉和支链淀粉、总糖、可溶性糖、还原糖、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、灰分及矿质元素等。

板栗在采后或贮藏期间, 果仁内腐病发生严重^[10-11]。研究发现, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性维持在一个较高的水平有利于板栗贮藏^[12]; POD、多酚氧化酶 (PPO)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活

收稿日期: 2021-08-21 修回日期: 2021-11-01

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2018ZB001-1); 国家林业和草原局科技发展中心项目 (KJZXSA2019045)

* 通讯作者: 史胜青, 研究员, 主要研究方向: 林木抗逆机制与壳斗科资源选育。电话: 13616244858。Email: shi.shengqing@caf.ac.cn

性下降时内腐病发生严重,而增强时腐烂现象则减缓^[13],表明抗氧化酶的活性对板栗采后坚果品质的维持具有十分重要的作用。然而,目前对板栗抗性物质的研究多集中在贮藏期间以及叶、壳和花中^[12-16],在板栗种质评价中进行板栗抗性物质的研究尚且较少。

本研究在对燕山地区63个板栗种质进行营养评价^[17]的基础上,以河北省迁西县3个板栗品种为参照,对收集的14个板栗优良单株坚果的营养物质和抗氧化成分进行分析,并采用隶属函数-因子分析相结合的方法进行综合评价,以期为优良板栗品种选育及采后运输和贮藏等提供理论依据。

1 材料与方法

2020年秋季在河北省燕山地区成年板栗园(树龄均在35年以上)收集18份种质。4份栽培

品种包括燕奎、燕山短枝和燕山早丰,其中,燕山早丰分别采集于迁西县和青龙县2个栗园;其余14份种质在走访农户和实地调查的基础上采集,选取具有高产、稳产,坚果大小均匀、品相口感好,抗病虫、耐贫瘠、抗旱性强等特点的单株或农家种。当树上约1/3以上栗苞自然裂开落果后,采集健康无病害的坚果。每个种质随机取3~5 kg健康坚果,在当地冷库(0~2℃)或冰箱(4℃)临时贮藏后带回实验室。一部分称质量烘干保存,用于营养物质和维生素C测定;一部分置于-80℃冰箱保存,用于抗氧化成分测定。每个种质3个实验重复,每个重复随机选取15~20个大小均匀的坚果。

1.1 植物材料

采集的板栗种质相关信息见表1。

表1 板栗种质采集信息
Table 1 Collection information of chestnut germplasms

代号或名称 Name	单株类型 Plant type	采集地 Collection location	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude
QL3113青龙燕山早丰	栽培品种	青龙满族自治县娄杖子镇	118°40'07"	40°21'56"
QX3113迁西燕山早丰	栽培品种	迁西县汉儿庄镇	118°15'11"	40°24'07"
QX107迁西燕奎	栽培品种	迁西县汉儿庄镇	118°15'11"	40°24'07"
HHZ20燕山短枝	栽培品种	迁西县汉儿庄镇	118°15'11"	40°24'07"
LJT	实生树	迁西县罗家屯镇	118°26'28"	40°09'31"
YHZ	实生树	迁西县渔户寨乡	118°24'44"	40°18'03"
JCY-1	实生树	迁西县金厂峪镇	118°29'28"	40°19'40"
JCY-2	实生树	迁西县金厂峪镇	118°31'27"	40°21'36"
JCY-3	实生树	迁西县金厂峪镇	118°27'26"	40°19'44"
XCZ	实生树	迁西县兴城镇	118°16'59"	40°08'42"
TPZ	实生树	迁西县太平寨镇	118°30'43"	40°19'21"
YZX	实生树	迁西县尹庄乡	118°30'09"	40°07'37"
ZQ1	实生树	青龙满族自治县娄杖子镇	118°40'07"	40°21'56"
ZJ2	实生树	迁西县汉儿庄镇	118°15'11"	40°24'07"
JIH	实生树	迁西县汉儿庄镇	118°15'11"	40°24'07"
LMY-1	实生树	迁西县洒河镇	118°13'03"	40°20'01"
JSY-7	实生树	迁西县汉儿庄镇	118°14'36"	40°23'11"
QTC	实生树	迁西县太平寨镇	118°36'23"	40°15'39"

1.2 指标测定方法

1.2.1 表型特征测定 用游标卡尺分别测量坚果的横、纵、侧径,果形指数=坚果纵径/横径^[18],体

积 $V=(4/3)\pi abc$ (a 、 b 、 c 分别代表横径、纵径、侧径值的一半)^[19-20]。

1.2.2 单果鲜质量和含水量测定 参照 GB/T

5009.3—2003《食品中水分的测定》，利用千分之一天平测定15~20个坚果鲜质量并记录；然后，参照曹小艳等^[21]方法略有修改，将每个坚果切成均等4份，放入105℃烘箱中杀青30 min，65℃烘至恒质量，测定干质量并记录，计算单果鲜质量和含水量。

1.2.3 营养指标测定 利用蒽酮比色法测定可溶性糖、淀粉，利用氨基酸与水 and 茚三酮生成紫色化合物的原理测定总氨基酸，具体测定方法详见植物可溶性糖含量试剂盒、植物淀粉含量试剂盒、氨基酸含量测定试剂盒（苏州科铭生物技术有限公司）。利用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白，具体测定方法详见改良型Bradford蛋白浓度测定试剂盒（上海生工生物工程有限公司）。

1.2.4 抗氧化指标测定 维生素C是利用它与固蓝盐B在乙酸溶液中反应生成黄色的草酰肼-2-羟基丁酰内脂生物的原理测定；超氧化物歧化酶（SOD）是利用黄嘌呤及黄嘌呤氧化酶反应系统产生的超氧阴离子与WST-8反应产生水溶性染料甲臞的原理测定；多酚氧化酶（PPO）是利用PPO能够催化邻苯二酚产生醌的原理测定；过氧化物酶（POD）是利用POD催化H₂O₂氧化特定底物的原理测定；过氧化氢酶（CAT）是利用CAT能够分解H₂O₂的原理测定。具体测定方法详见相关试剂盒（苏州科铭生物技术有限公司）。

总多酚含量测定：采用福林酚比色法测定^[22]。称取0.1 g样品，加入5 mL 50%甲醇超声波提取30 min。然后，12 000 r·min⁻¹离心10 min，去上清液至于4℃待测。以没食子酸（北京世纪奥科生物技术有限公司）为标准，配置质量浓度为0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 mg·mL⁻¹的系列标准溶液。按照待测液/标准液:福林酚:Na₂CO₃溶液为1.5:4比例，分别加入10%福林酚试剂和7.5% Na₂CO₃溶液，混匀后在25℃条件下避光放置40 min，记录波长725 nm下吸光值A。利用标准曲线方程 $y=0.005 6x+0.012 4$ 计算，式中，x为总多酚含量，y为吸光值A。

总黄酮含量测定：提取方法同总多酚含量测定，采用比色法测定^[23]。以槲皮素（北京素莱宝科技有限公司）为标准，配制质量浓度为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg·mL⁻¹的系列标准溶液。取25 μL待测液/标准液加入7.5 μL 5% NaNO₂，混匀，立即加入7.5 μL 10% Al(NO₃)₃，静置5 min，再

依次加入50 μL 4% NaOH和160 μL 50%甲醇，混匀，静置5 min后，在波长510 nm处测定吸光值A。利用标准曲线方程 $y=0.000 5x-0.000 05$ 计算，式中，x为总黄酮含量，y为吸光值A。

1.3 数据分析

利用Microsoft Excel 2010、SPSS 20.0软件对原始数据进行方差分析、相关性分析和因子分析。

应用计算公式 $S_{(in)}=(X_{in}-X_{imin})/(X_{imax}-X_{imin})$ 对原始数据进行标准化得到隶属函数值，其中， $S_{(in)}$ 指第n个样品第i个指标， X_{in} 指第n个样品第i个指标的原始测定值， X_{imax} 、 X_{imin} 分别为第i个指标的最大值和最小值。之后利用因子分析筛选出影响果实品质的若干公因子，同时得到各个指标的公因子分值 F_m ，以每个公因子分值 F_m 乘以因子分析中相对应的方差贡献率 E_m ，最后相加得到综合得分D，其计算公式为：

$$D=\sum(E_i \times F_i)$$

式中： E_i 为样品第i个公因子分值， F_i 为第i个公因子的方差贡献率， $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ ，n为公因子的个数^[24]。

2 结果与分析

2.1 板栗坚果外部特征

18份板栗种质单果鲜质量之间存在较大差异（表2），平均为9.65 g，其中，QTC的单果鲜质量最小（7.88 g），TPZ的最大（12.51 g），TPZ是QTC的1.59倍。坚果果型指数变化幅度为0.65~0.89（表2），其中，JCY-3和JSY-7的果型指数最大，均为0.89，说明这二者坚果形状最近似圆形；而QL3113的果型指数只有0.65，说明该坚果形状近似扁圆形。TPZ的体积最大（9.72 cm³），YZX的体积最小（6.37 cm³），TPZ体积是YZX的1.53倍。

2.2 板栗坚果营养物质

不同种质板栗坚果营养物质含量均有一定差异，其中，可溶性糖（24.25%）、可溶性蛋白（34.72%）的变异系数较大（表3）。含水量为45.95%~51.59%，TPZ和ZJ2的水分含量较高，分别为51.59%和51.55%。淀粉含量为38.28%~53.69%，其中，>50.00%的有QL3113、QX3113、LJT、JCY-3、YZX、LMY-1。可溶性糖含量为4.51%~11.62%，其中，>10.00%的有QL3113、QX3113和ZQ1。可溶性蛋白质含量为0.35%~

表2 板栗坚果外部形态特征

Table 2 External morphological characteristics of chestnut nuts

编号 NO.	名称 Name	形态指标 Morphological indexes					
		单果鲜质量 Fruit fresh weight/g	横径 Transverse diameter/mm	纵径 Vertical diameter/mm	侧径 Lateral diameter/mm	果型指数 Nut shape index	坚果体积 Nut volume/cm ³
1	QL3113	7.98 ± 0.06 k	34.84	22.54	18.73	0.65	7.70
2	QX3113	9.37 ± 0.16 fgh	29.39	22.82	22.30	0.78	7.83
3	QX107	11.34 ± 0.23 b	34.41	28.12	19.10	0.82	9.67
4	HHZ20	9.62 ± 0.42 efgh	30.98	25.92	18.98	0.84	7.98
5	LJT	8.35 ± 0.10 jk	28.97	25.29	20.44	0.87	7.84
6	YHZ	10.80 ± 0.32 bcd	32.39	25.73	21.15	0.79	9.22
7	JCY-1	9.21 ± 0.13 ghi	28.21	24.13	19.46	0.86	6.93
8	JCY-2	9.48 ± 0.11 fgh	28.79	24.43	21.56	0.85	7.94
9	JCY-3	9.09 ± 0.08 hij	29.12	26.05	20.83	0.89	8.27
10	XCZ	9.99 ± 0.30 efg	31.05	26.05	18.81	0.84	7.96
11	TPZ	12.51 ± 0.25 a	33.40	27.52	20.21	0.82	9.72
12	YZX	8.43 ± 0.18 ijk	28.37	24.29	17.65	0.86	6.37
13	ZQ1	9.60 ± 0.11 fgh	31.15	27.00	21.57	0.87	9.49
14	ZJ2	10.40 ± 0.12 cde	31.88	25.84	20.12	0.81	8.67
15	JIH	11.07 ± 0.16 bc	30.95	27.35	21.85	0.88	9.68
16	LMY-1	10.09 ± 0.02 def	30.68	26.16	18.39	0.85	7.72
17	JSY-7	8.55 ± 0.06 ijk	28.25	25.25	19.60	0.89	7.32
18	QTC	7.88 ± 0.70 k	30.29	24.53	18.39	0.81	7.15
均值 Mean		9.65	30.73	25.50	19.95	0.83	8.19

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$).

1.15%, 其中, >1.00% 的有 QL3113、QX3113、QX107 和 ZQ1。氨基酸含量为 1.03%~1.82%, 其中, >1.70% 的有 QX107、ZQ1、ZJ2。结果表明, ZQ1 与现有栽培品种燕山早丰、燕奎比较接近, 有待于深入挖掘。

2.3 板栗坚果抗氧化成分

表4表明: 18份板栗种质中, PPO的变异系数最大(64.51%), CAT的变异系数次之(33.85%)。SOD为717.40~1310.42 U·g⁻¹, 其中, >100.00 U·g⁻¹的有QL3113、YHZ、XCZ、TPZ、YZX、JIH。PPO为11.22~89.06 U·g⁻¹, 其中, >80.00 U·g⁻¹的有YZX、ZQ1、LMY-1。POD为3009.33~5965.33 U·g⁻¹, 其中, >5000.00 U·g⁻¹的有QL3313、ZJ2、JIH。CAT为48.20~367.19 nmol·min⁻¹·g⁻¹, 其中, >340.00 nmol·min⁻¹·g⁻¹的有QL3113、LJT、JIH、QTC。维生素C含量为203.81~595.40 μg·g⁻¹, 其中, >560.00 μg·g⁻¹的

有QL3313、JSY-7、QTC。总多酚含量为338.67~822.33 μg·g⁻¹, 其中, >700.00 μg·g⁻¹的有QX3113、QX107、JCY-1、XCZ、ZJ2、LMY-1。总黄酮含量为89.67~146.00 μg·g⁻¹, 其中, >130.00 μg·g⁻¹的有QL3313、QX3113、QX107、ZQ1、ZJ2。结果表明, 18份板栗种质抗氧化成分均存在较大差异, 其中, ZJ2、ZQ1和QTC与燕山早丰、燕奎比较接近, 有待于进一步比较分析。

2.4 各指标相关性分析

如表5所示: 单果鲜质量与体积、含水量呈极显著正相关, 与维生素C呈极显著负相关; 可溶性糖、可溶性蛋白、氨基酸和总多酚与总黄酮呈极显著正相关; 可溶性糖、氨基酸和总黄酮与SOD呈极显著负相关。

果形指数与可溶性蛋白、总黄酮和POD呈显著负相关, 与PPO呈显著正相关; 体积与含水量呈显著正相关; 淀粉与可溶性蛋白、维生素C和

表 3 不同种质板栗坚果营养指标

Table 3 Nut nutrient indices of different chestnut germplasms

编号 NO.	名称 Name	营养指标 Nutrient indexes/%				
		含水量 Water content	淀粉 Starch	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	氨基酸 Amino acid
1	QL3113	48.29 ± 1.57	53.60 ± 2.21	10.15 ± 0.69	1.15 ± 0.04	1.51 ± 0.01
2	QX3113	47.40 ± 0.79	51.40 ± 1.61	10.95 ± 0.44	1.05 ± 0.04	1.47 ± 0.07
3	QX107	49.76 ± 0.34	49.23 ± 4.56	9.30 ± 0.32	1.11 ± 0.03	1.82 ± 0.02
4	HHZ20	46.45 ± 0.18	38.30 ± 0.93	9.45 ± 0.55	0.48 ± 0.11	1.53 ± 0.06
5	LJT	45.95 ± 1.07	53.69 ± 4.05	7.69 ± 0.31	0.73 ± 0.17	1.45 ± 0.07
6	YHZ	50.17 ± 3.34	39.17 ± 2.36	4.51 ± 0.53	0.72 ± 0.04	1.63 ± 0.03
7	JCY-1	48.67 ± 0.63	38.28 ± 2.39	8.40 ± 1.04	0.50 ± 0.03	1.35 ± 0.10
8	JCY-2	49.41 ± 0.96	45.11 ± 3.35	5.18 ± 0.21	0.82 ± 0.20	1.55 ± 0.13
9	JCY-3	49.64 ± 0.18	50.34 ± 1.17	9.20 ± 0.53	0.40 ± 0.17	1.36 ± 0.11
10	XCZ	49.12 ± 0.38	44.36 ± 1.67	6.59 ± 0.91	0.57 ± 0.10	1.35 ± 0.07
11	TPZ	51.59 ± 0.71	46.08 ± 1.27	6.76 ± 0.52	0.35 ± 0.03	1.03 ± 0.01
12	YZX	47.05 ± 0.37	51.82 ± 2.68	5.10 ± 1.02	0.89 ± 0.26	1.27 ± 0.10
13	ZQ1	46.72 ± 0.49	48.26 ± 4.16	11.62 ± 0.53	1.05 ± 0.19	1.72 ± 0.01
14	ZJ2	51.55 ± 0.45	45.60 ± 4.16	7.58 ± 0.49	0.58 ± 0.10	1.77 ± 0.05
15	JIH	50.22 ± 0.37	43.50 ± 1.03	7.58 ± 0.91	0.62 ± 0.22	1.47 ± 0.06
16	LMY-1	49.39 ± 0.31	52.95 ± 3.06	7.47 ± 0.55	0.45 ± 0.11	1.52 ± 0.08
17	JSY-7	49.26 ± 0.66	44.71 ± 1.71	8.95 ± 1.50	0.59 ± 0.14	1.51 ± 0.10
18	QTC	48.58 ± 0.33	46.24 ± 4.78	6.81 ± 0.73	0.84 ± 0.44	1.66 ± 0.02
均值 Mean		48.85	46.81	7.96	0.72	1.50
标准差 SD		1.58	4.88	1.93	0.25	0.18
变异系数 CV/%		3.23	10.43	24.25	34.72	12.00

总黄酮呈显著正相关；可溶性糖与总多酚呈显著正相关；可溶性蛋白与氨基酸、维生素 C 呈显著正相关，与 SOD 呈显著负相关；PPO 与 CAT 呈显著负相关。

2.5 不同种质板栗品质因子分析

如表 6 所示：在不含抗氧化酶时，因子 1 在总黄酮、可溶性糖和总多酚上的载荷值较大；因子 2 在单果鲜质量、含水量和体积上的载荷值较大；因子 3 在维生素 C、淀粉和可溶性蛋白上的载荷值较大。3 个因子累计贡献率为 67.612%。如表 7 所示：在含抗氧化酶时，因子 1 在 SOD、氨基酸和总黄酮上的载荷值较大；因子 2 在单果鲜质量、体积和含水量上的载荷值较大；因子 3 在 CAT、PPO 和维生素 C 上的载荷值较大；因子 4 在果型指数、POD 和总多酚上的载荷值较大；因子 5 在淀粉、可溶性糖和总黄酮上的载荷值较

大。5 个因子累计贡献率为 78.140%，表明所列因子可代替评价板栗的品质质量，能够反映原始数据的大部分信息。

2.6 板栗种质品质综合评价

利用隶属函数-因子分析相结合的方法，得到各个指标的公因子得分，再根据各自方差贡献率，建立板栗营养物质和抗氧化成分综合评价的数学模型：

$$F_y = (26.756F_1 + 21.614F_2 + 19.242F_3) / 100 \quad (1)$$

$$F_y = (20.783F_1 + 18.039F_2 + 14.271F_3 + 13.501F_4 + 11.546F_5) / 100 \quad (2)$$

式中： F_y 代表综合得分， $F_1 \sim F_5$ 分别代表因子 1~因子 5。

由表 8、9 可看出：18 份板栗种质品质存在显著差异。4 份栽培品种中，有或无抗氧化酶时综合得分排名均为：QX107 > QL3113 > QX3113 > HHZ20，

表4 不同种质板栗坚果抗氧化指标
Table 4 Nut antioxidant indices of different chestnut germplasms

编号 NO.	名称 Name	抗氧化指标 Antioxidant indexes						
		超氧化物歧化酶 SOD/ (U·g ⁻¹)	多酚氧化酶 PPO/ (U·g ⁻¹)	过氧化物酶 POD/ (U·g ⁻¹)	过氧化氢酶 CAT/ (nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	维生素C Vitamin C/ (μg·g ⁻¹)	总多酚 Total polyphenol/ (μg·g ⁻¹)	总黄酮 Total flavonoid/ (μg·g ⁻¹)
1	QL3113	1 104.59 ± 37.37	11.22 ± 1.72	5 424.00 ± 179.44	348.82 ± 48.68	564.07 ± 46.55	683.33 ± 3.84	145.33 ± 5.54
2	QX3113	799.00 ± 53.85	21.36 ± 3.15	4 188.00 ± 261.11	308.41 ± 88.77	470.97 ± 46.18	796.33 ± 23.38	145.67 ± 0.79
3	QX107	894.11 ± 101.06	18.23 ± 1.56	4 320.00 ± 179.17	314.98 ± 26.51	417.24 ± 12.36	822.33 ± 15.84	144.33 ± 2.56
4	HHZ20	944.50 ± 36.34	66.64 ± 5.77	4 320.00 ± 161.15	186.11 ± 22.43	203.81 ± 17.51	501.00 ± 17.35	113.00 ± 0.81
5	LJT	1 060.81 ± 33.05	38.96 ± 6.34	3 645.33 ± 144.17	350.16 ± 17.26	508.15 ± 71.31	470.00 ± 9.07	97.00 ± 0.90
6	YHZ	1 102.69 ± 45.54	27.38 ± 3.34	4 752.00 ± 128.75	316.92 ± 31.23	434.04 ± 97.53	385.33 ± 26.85	89.67 ± 3.11
7	JCY-1	1 047.25 ± 60.78	74.67 ± 5.10	3 045.33 ± 225.83	260.14 ± 25.48	329.77 ± 47.60	773.33 ± 51.30	99.67 ± 9.21
7	JCY-2	1 010.34 ± 60.80	34.55 ± 5.71	3 681.33 ± 216.79	165.53 ± 20.23	528.00 ± 33.50	573.33 ± 24.88	106.33 ± 1.10
8	JCY-3	1 042.59 ± 38.71	30.86 ± 2.14	3 009.33 ± 178.07	304.50 ± 16.32	446.43 ± 68.96	338.67 ± 6.06	103.00 ± 0.88
9	XCZ	1 130.47 ± 61.58	21.14 ± 1.26	4 373.33 ± 75.34	77.68 ± 8.47	355.75 ± 71.97	718.00 ± 10.82	103.33 ± 0.96
10	TPZ	1 310.42 ± 20.37	26.43 ± 6.15	4 013.33 ± 209.38	283.56 ± 9.17	301.13 ± 14.07	436.67 ± 28.98	97.67 ± 6.00
11	YZX	1 138.58 ± 55.71	89.06 ± 8.33	3 936.00 ± 149.45	284.37 ± 36.50	412.29 ± 53.46	343.67 ± 4.81	101.00 ± 2.12
12	ZQ1	717.40 ± 13.57	83.67 ± 1.89	3 494.67 ± 263.05	48.20 ± 7.54	443.01 ± 46.53	626.67 ± 6.36	146.00 ± 2.16
13	ZJ2	955.12 ± 81.36	32.45 ± 1.25	5 582.67 ± 216.69	329.26 ± 61.90	279.31 ± 21.99	728.33 ± 9.33	134.33 ± 8.29
15	JIH	1 177.03 ± 60.80	37.36 ± 4.69	5 965.33 ± 109.89	367.19 ± 37.40	443.38 ± 43.17	417.33 ± 32.09	111.33 ± 2.36
16	LMY-1	1 033.95 ± 82.20	87.41 ± 2.13	3 688.00 ± 246.13	220.71 ± 17.39	499.44 ± 65.92	711.33 ± 28.42	126.33 ± 0.84
17	JSY-7	819.82 ± 133.11	14.54 ± 3.80	3 950.67 ± 188.13	321.77 ± 37.21	595.40 ± 73.90	428.33 ± 13.30	109.00 ± 1.60
18	QTC	934.01 ± 58.94	13.95 ± 2.93	3 646.67 ± 212.97	353.79 ± 28.12	593.12 ± 15.24	557.67 ± 31.99	115.67 ± 2.38
	均值 Mean	1 012.37	40.55	4 168.67	269.01	434.74	572.87	116.04
	标准差 SD	142.41	26.16	796.96	91.05	105.64	158.82	18.66
	变异系数 CV/%	14.07	64.51	19.12	33.85	24.30	10.55	7.05

表明3个良种中QX107品质较好, HHZ20品质较差。除3个良种外, 无抗氧化酶时综合得分前4名分别是ZQ1、ZJ2、LMY-1、QTC; 有抗氧化酶时综合评价前4名分别是ZJ2、ZQ1、JIH、QTC。其中, QTC坚果在18份板栗种质中个头较小。

3 讨论

燕山板栗种质资源丰富, 遗传多样性复杂。对地方种质资源进行综合评价, 筛选优良、丰产、早熟型板栗, 有利于地方种质品种选育和改良^[25-26]。由于板栗品质受基因型、环境条件、栽培技术等众多因素的影响^[27], 因此, 后续研究还需将这几个优良种质在同一资源圃中种植后再进行比较。以往种质评价研究主要将形态特征和营养指标考虑在内, 本研究发现, 18份板栗种质无论是在种实特征、营养物质还是抗氧化成分方面均存在显著差异。

18份板栗种质中淀粉、可溶性糖、可溶性蛋白、氨基酸含量变异系数为10.43%~34.72%, SOD、PPO、POD、CAT、维生素C、总多酚、总黄酮变异系数为7.05%~64.51%, 营养物质中以可溶性蛋白含量变异系数最大, 抗氧化成分中PPO活性变异系数最大。含水量的变化范围与杜常健等^[17]对相同分布区的63份板栗种质研究结果类似, 含水量影响板栗贮藏时间长短, 因此, 把含水量纳入品质评价中具有重要意义。可溶性糖直接影响板栗的甜度和风味, 其含量的高低与板栗自身抗性密切相关^[28], 因此, 可溶性糖是品质评价的一个重要指标。可溶性糖的变化范围为4.51%~11.62%, 比路超等^[9]研究结果略高, 与杜长健等^[17]研究结果类似, 因此, 本研究为筛选含糖量较高的板栗种质提供了借鉴。淀粉可以转化为可溶性糖, 在果实品质的形成过程中发挥着重要作用^[29], 是决定板栗食用

表 5 板栗坚果品质指标相关性系数

Table 5 Correlation coefficients of chestnut nut quality indices

品质指标 Quality indexes	单果鲜质量 Single seed fresh	果型指数 Nut shape index	体积 Volume	含水量 Water content	淀粉 Starch	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	氨基酸 Amino acid	维生素C Vitamin C	总多酚 Total polyphenol	总黄酮 Total flavonoid	超氧化物歧化酶 SOD	多酚氧化酶 PPO	过氧化物酶 POD
果型指数 Nut shape index	0.101													
体积 Volume	0.804**	0.000												
含水量 Water content	0.647**	-0.054	0.458 [*]											
淀粉 Starch	-0.308	-0.210	-0.142	-0.248										
可溶性糖 Soluble sugar	-0.167	-0.139	0.134	-0.359	0.245									
可溶性蛋白 Soluble protein	-0.311	-0.501 [*]	0.002	-0.396	0.420 [*]	0.309								
氨基酸 Amino acid	-0.092	-0.145	0.218	-0.039	-0.033	0.242	0.490 [*]							
维生素C Vitamin C	-0.539**	-0.129	-0.269	-0.144	0.494 [*]	0.022	0.442 [*]	0.200						
总多酚 Total polyphenol	0.063	-0.369	-0.005	0.007	0.096	0.405 [*]	0.349	0.394	-0.087					
总黄酮 Total flavonoid	-0.046	-0.452 [*]	0.193	-0.119	0.424 [*]	0.712**	0.637**	0.572**	0.140	0.666**				
超氧化物歧化酶 SOD	0.330	-0.102	0.071	0.390	-0.064	-0.622**	-0.443 [*]	-0.674**	-0.237	-0.380	-0.605**			
多酚氧化酶 PPO	-0.050	0.412 [*]	-0.221	-0.397	-0.021	0.002	-0.166	-0.110	-0.320	-0.041	-0.060	-0.047		
过氧化物酶 POD	0.303	-0.469 [*]	0.382	0.348	-0.092	-0.062	0.174	0.247	-0.134	0.062	0.268	0.231	-0.346	
过氧化氢酶 CAT	-0.096	-0.255	-0.057	0.246	0.184	-0.101	0.043	0.005	0.283	-0.227	-0.066	0.223	-0.444 [*]	0.331

注: *表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$)。下同。

Notes: *Significance is 0.05, **Significance is 0.01. The same below.

表 6 板栗坚果品质指标因子分析 (不含抗氧化酶)

Table 6 Factor analysis of chestnut nut quality indices (in the absence of antioxidant enzymes)

品质指标 Quality indexes	因子1 Factor1	因子2 Factor2	因子3 Factor3	共同度 Common degrees
单果鲜质量 Single seed fresh	0.023	0.871	-0.370	0.896
果型指数 Nut shape index	-0.363	-0.162	-0.517	0.425
体积 Volume	0.245	0.805	-0.127	0.724
含水量 Water content	-0.237	0.846	0.001	0.772
淀粉 Starch	0.155	-0.226	0.650	0.498
可溶性糖 Soluble sugar	0.787	-0.261	-0.088	0.695
可溶性蛋白 Soluble protein	0.548	-0.147	0.648	0.742
氨基酸 Amino acid	0.586	0.124	0.252	0.423
维生素 C Vitamin C	-0.120	-0.257	0.824	0.760
总多酚 Total polyphenol	0.760	0.070	0.029	0.584
总黄酮 Total flavonoid	0.903	0.048	0.320	0.920
方差贡献率 Variance contribution/%	26.756	21.614	19.242	—
累计贡献率 Cumulative contribution/%	26.756	48.370	67.612	—
权重系数 Weight coefficient	0.396	0.320	0.285	—

表 7 板栗坚果品质指标因子分析 (含抗氧化酶)

Table 7 Factor analysis of chestnut nut quality indices (in the presence of antioxidant enzymes)

品质指标 Quality indexes	因子1 Factor1	因子2 Factor2	因子3 Factor3	因子4 Factor4	因子5 Factor5	共同度 Common degrees
单果鲜质量 Single seed fresh	-0.158	0.925	-0.164	0.035	-0.130	0.926
果型指数 Nut shape index	-0.027	0.074	-0.257	-0.877	-0.153	0.864
体积 Volume	0.177	0.915	0.045	-0.014	0.068	0.876
含水量 Water content	-0.214	0.695	0.337	0.076	-0.269	0.720
淀粉 Starch	-0.009	-0.187	0.188	0.070	0.887	0.863
可溶性糖 Soluble sugar	0.571	0.035	-0.264	0.107	0.502	0.660
可溶性蛋白 Soluble protein	0.537	-0.253	0.208	0.409	0.369	0.699
氨基酸 Amino acid	0.869	0.048	0.190	0.133	-0.188	0.846
维生素 C Vitamin C	0.232	-0.406	0.651	-0.177	0.364	0.806
总多酚 Total polyphenol	0.483	0.040	-0.318	0.561	0.091	0.658
总黄酮 Total flavonoid	0.691	0.115	-0.090	0.474	0.468	0.942
超氧化物歧化酶 SOD	-0.917	0.207	0.115	0.157	-0.087	0.929
多酚氧化酶 PPO	-0.085	-0.214	-0.730	-0.239	0.033	0.644
过氧化物酶 POD	0.013	0.392	0.339	0.615	-0.174	0.677
过氧化氢酶 CAT	-0.183	0.000	0.745	0.135	0.068	0.611
方差贡献率 Variance contribution/%	20.783	18.039	14.271	13.501	11.546	
累计贡献率 Cumulative contribution/%	20.783	38.822	53.093	66.594	78.140	
权重系数 Weight coefficient	0.266	0.231	0.183	0.173	0.148	

表 8 不同种质板栗坚果品质综合评价 (根据式 (1))

Table 8 Comprehensive evaluation of nut qualities from different chestnut germplasms (according to equation (1))

种质 Germplasm	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2	因子3 Factor 3	综合得分 Comprehensive score	排序 Order
QX107	3.159	1.525	1.292	1.423	1
QL3113	3.005	0.047	2.414	1.279	2
QX3113	3.042	0.211	1.635	1.174	3
ZQ1	3.033	0.545	1.231	1.166	4
ZJ2	2.128	1.657	0.497	1.023	5
LMY-1	1.652	0.747	1.014	0.799	6
QTC	1.484	0.080	1.511	0.705	7
JIH	1.032	1.584	0.298	0.676	8
JCY-2	1.062	0.768	1.000	0.642	9
YHZ	0.544	1.641	0.374	0.572	10
XCZ	1.154	0.937	0.293	0.568	11
TPZ	0.354	2.167	-0.305	0.504	12
JSY-7	0.978	0.235	0.897	0.485	13
LJT	1.087	-0.228	1.175	0.468	14
HHZ20	1.454	0.577	-0.263	0.463	15
JCY-1	1.191	0.520	-0.056	0.420	16
JCY-3	0.686	0.621	0.498	0.414	17
YZX	0.514	-0.282	1.085	0.285	18

表 9 不同种质板栗坚果营养品质综合评价 (根据式 (2))

Table 9 Comprehensive evaluation of nut qualities from different chestnut germplasms (according to equation (2))

种质 Germplasm	因子1 Factor1	因子2 Factor2	因子3 Factor3	因子4 Factor4	因子5 Factor5	综合得分 Comprehensive score	排序 Order
QX107	2.502	1.959	1.002	1.421	1.511	1.383	1
QL3113	1.967	0.514	1.793	2.108	2.175	1.293	2
QX3113	2.441	0.625	0.840	1.365	2.042	1.160	3
ZJ2	1.457	2.181	0.914	1.268	0.572	1.064	4
ZQ1	2.890	0.849	-0.508	0.411	1.820	0.947	5
JIH	0.364	2.315	1.306	0.466	0.419	0.791	6
QTC	1.383	0.205	1.552	0.483	1.101	0.738	7
JSY-7	1.161	0.565	1.318	-0.114	0.900	0.620	8
YHZ	0.206	1.920	1.391	0.328	-0.108	0.620	9
LMY-1	1.007	0.921	0.160	0.243	1.289	0.580	10
JCY-2	0.900	0.884	0.810	0.151	0.664	0.559	11
XCZ	0.509	1.391	0.257	0.444	0.419	0.502	12
TPZ	-0.849	2.726	0.769	0.101	0.254	0.468	13
LJT	0.670	0.135	1.030	-0.081	1.420	0.464	14
JCY-3	0.294	1.006	0.871	-0.483	0.997	0.417	15
HHZ20	0.983	1.083	-0.390	0.150	0.297	0.398	16
JCY-1	0.553	0.681	-0.255	-0.012	0.282	0.232	17
YZX	-0.018	-0.144	0.497	-0.189	1.067	0.139	18

质的最主要因素。淀粉含量的变化范围为 38.28%~53.69%，与张乐等^[30]的测定结果 22.89%~24.58% 存在差异，原因可能是：一方面板栗不同种质差异显著，另一方面可能是采样区域不同。此外，可溶性蛋白也是评价板栗营养价值的重要指标。由于测定方法不同，本研究中测定的可溶性蛋白含量为 0.35%~1.15%，低于张乐等^[30]和刘艳等^[6]测定的粗蛋白含量。

植物病害因造成产量下降和经济损失而受到人们广泛关注，如板栗的叶焦枯病^[31]、果仁内腐病^[10-11]，柿果的顶腐病^[32]。由于板栗含水量在 50% 左右，采后及贮藏过程中容易发生腐烂。因此，采后合理贮藏是板栗果实能够发挥食用价值和经济价值的关键一步。板栗坚果随贮藏时间延长容易产生并积累活性氧，膜脂过氧化加剧，腐烂率增加^[33]。抗氧化酶 SOD、CAT 和 POD 在板栗贮藏过程中可以通过清除果实体内的活性氧，有效阻止膜脂过氧化，降低腐烂率^[12-13]，PPO 与植物褐变密切相关^[34]。本研究首次将 4 种抗氧化酶引入到板栗种质评价中，发现无论有或无抗氧化酶指标，3 个良种中燕奎和燕山早丰综合排名均在前；其余 14 份种质中

ZJ2、ZQ1 综合排名总体在前，值得后续深入挖掘。LMY-1 在无抗氧化酶指标时排名在前，但有抗氧化酶指标时排名偏后，是否意味着种质不耐贮藏，还需后续进一步验证。

此外，抗氧化酶活性的高低与外界环境变化密切相关。有研究发现，热处理能抑制板栗果实贮藏过程中呼吸强度以及 POD、CAT 活性^[35]。本研究在 4 种抗氧化酶活性测定过程中实验条件一致，并且在采样过程中也尽可能保证贮藏条件相似，可以排除测定过程和采集时外部因素的干扰。另外，2 种评价体系中青龙县和迁西县两地栗园的燕山早丰综合排名均在前。因此，除生长环境影响外，所获得的抗氧化酶活性高低应该是该种质内在特征。这表明抗氧化酶可以考虑作为板栗种质评价指标。

4 结论

本研究采用外观特征、营养物质、抗氧化成分以及新引入的 4 种抗氧化酶为指标，对燕山地区 4 份栽培品种和 14 份候选种质进行综合评价发现，除栽培品种外，ZJ2 和 ZQ1 可以作为候选优良种质深入挖掘；抗氧化酶 SOD、POD、CAT 和

PPO 可以考虑作为板栗种质评价的指标。今后将在种质资源保存圃中对这 2 个候选优良种质及抗氧化酶指标进行深入研究。

参考文献:

- [1] Zou F, Guo S J, Xie P, *et al.* Megasporogenesis and development of female gametophyte in Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) cultivar 'Yanshanzaofeng'[J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2014, 16(5): 1001-1005.
- [2] Zhang L, Lin Q, Feng Y, *et al.* Transcriptomic identification and expression of starch and sucrose metabolism genes in the seeds of Chinese chestnut (*Castanea mollissima*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(3): 929-942.
- [3] Li Q, Shi X, Zhao Q, *et al.* Effect of cooking methods on nutritional quality and volatile compounds of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume)[J]. *Food Chemistry*, 2016, 201: 80-86.
- [4] 陈在新, 雷泽湘, 刘会宁, 等. 板栗营养成分分析及其品质的模糊综合评判[J]. *果树学报*, 2000, 17(4): 286-289.
- [5] 刘帅, 陈良珂, 房克凤, 等. 板栗种子淀粉体发育的扫描电镜观察[J]. *电子显微学报*, 2015, 34(4): 346-350.
- [6] 刘艳, 柳文祥, 王金山, 等. 炒食板栗品种营养品质评价及糖组分分析[J]. *北京农学院学报*, 2013, 28(2): 21-24.
- [7] 周家华, 常虹, 熊融, 等. 不同板栗品种营养品质的模糊综合评价研究[J]. *食品工业*, 2013, 34(1): 113-116.
- [8] 于婷娟, 王慧卿, 白瑞娟, 等. 山东地区不同品种板栗品质研究[J]. *山东林业科技*, 2014, 44(4): 5-11.
- [9] 路超, 郭素娟. 16份板栗种质资源主要营养品质分析与综合评价[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(23): 358-362.
- [10] 张馨方, 郭燕, 李颖, 等. 板栗内腐病研究进展[J]. *中国植保导刊*, 2018, 38(11): 25-28, 38.
- [11] 王贵禧, 梁丽松, 宗亦臣. 板栗贮藏保鲜条件及品质变化研究[J]. *林业科学研究*, 2000, 13(2): 118-122.
- [12] 杨小胡, 梁丽松, 王贵禧. 水浴处理板栗MA贮藏期间抗氧化酶活性变化规律[J]. *湖南林业科技*, 2006, 33(4): 11-14.
- [13] 胡海文, 尚巧霞, 赵晓燕, 等. 板栗贮藏期三种抗性酶活性变化与实腐病发生的关系[C]. *中国植物保护学会学术年会*, 2010: 813.
- [14] 吴雪辉, 张喜梅, 李廷群, 等. 板栗花粗提物的抗氧化活性研究[J]. *现代食品科技*, 2008, 24(1): 14-16, 19.
- [15] 王敏, 周劲杰, 谢媛媛, 等. 板栗壳多酚对食用油脂的抗氧化作用[J]. *食品工业*, 2020, 41(1): 148-151.
- [16] 李钢, 彭飞, 尹洪洋, 等. 板栗叶总黄酮提取工艺的优化及其抗氧化活性[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 64-72.
- [17] 杜常健, 孙佳成, 武妍妍, 等. 燕山北部山区板栗优良种质资源收集及其品质评价[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(3): 1-11.
- [18] 马玉敏, 陈学森, 何天明, 等. 中国板栗3个野生居群部分表型性状的遗传多样性[J]. *园艺学报*, 2008, 35(12): 1717-1726.
- [19] Nishio S, Yamada M, Takada N, *et al.* Environmental variance and broad-sense heritability of nut traits in Japanese chestnut breeding[J]. *HortScience*, 2014, 49(6): 696-700.
- [20] 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[J]. *经济林研究*, 2017, 35(4): 13-21.
- [21] 曹小艳, 李志, 张卿, 等. 不同板栗品种(系)抗性淀粉综合评价[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(7): 39-46.
- [22] Gallardo A, Morcuende D, Solla A, *et al.* Regulation by biotic stress of tannins biosynthesis in *Quercus ilex*: Crosstalk between defoliation and *Phytophthora cinnamomi* infection[J]. *Physiologia Plantarum*, 2019, 165(2): 319-329.
- [23] Deng N, Chang E, Li M, *et al.* Transcriptome characterization of *Gnetum parvifolium* reveals candidate genes involved in important secondary metabolic pathways of flavonoids and stilbenoids[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7(222): 174.
- [24] 唐忠厚, 魏猛, 陈晓光, 等. 不同肉色甘薯块根主要营养品质特征与综合评价[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1705-1714.
- [25] 王广鹏, 张树航, 韩继成, 等. 燕山板栗新品种—'燕雀'的选育[J]. *果树学报*, 2013, 30(2): 328-329.
- [26] 黄杨, 熊信果, 邹小云, 等. 江西地方花生种质资源主要农艺性状分析与评价[J/OL]. *植物遗传资源学报*: 1-11 1-08-12. <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210316001>.
- [27] 唐兆宏, 刘霞, 刘树庆, 等. 燕山板栗和太行山板栗品质差异的研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(19): 103-107.
- [28] 邵艳军, 山仓, 李广敏. 干旱胁迫与复水条件下高粱、玉米苗期渗透调节及抗氧化比较研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 68-70.
- [29] 张慧琴, 谢鸣, 张琛, 等. 猕猴桃果实发育过程中淀粉积累差异及其糖代谢特性[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3453-3464.
- [30] 张乐, 赵改, 杨慧, 等. 不同板栗品种营养成分及风味物质分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(10): 164-169.
- [31] 任菲, 董炜, 史胜青, 等. 板栗叶焦枯病相关病菌分离及病因初探[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 185-192.
- [32] 邓全恩, 龚榜初, 吴开云, 等. 柿果生理病害顶腐病发病规律调查研究[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(5): 689-696.
- [33] 陆定志, 傅家瑞, 宋松泉. *植物衰老及其调控*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [34] 程丽莉, 程运河, 兰彦平, 等. 板栗PPO基因克隆及生物信息学分析[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(7): 1360-1365.
- [35] 蒋依辉, 陈金印, 钟云. 热处理对板栗果实生理及贮藏效果的影响[J]. *食品科学*, 2003, 24(3): 135-138.

Comprehensive Evaluation of Nutrients and Antioxidant Components in Nuts of Chestnut

WU Yan-yan¹, SHI Wen-shi², SHI Xin-ru¹, CHEN Rong-rong¹, ZHAO Yue¹, ZHAO Jia-bing¹,
JIANG Ze-ping³, WANG Zhi-wei⁴, SHI Sheng-qing¹

(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, the Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Division of Sci-Tech achievement transformation and industrial development, the Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, the Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Xiaolugou village, Louzhangzi town, Qinglong Manchu Autonomous County, Qinhuangdao 066508, Hebei, China)

Abstract: [Objective] To explore the feasibility of antioxidant enzymes as germplasm evaluation indices of chestnut (*Castanea mollissima*) and improve the evaluation system of excellent germplasm resources. [Method] Eighteen chestnut germplasms were collected in the areas of Yanshan Mountains in Hebei Province. The appearance traits, nutrients and antioxidant components (including 4 enzymatic indexes: superoxide dismutase (SOD), polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), catalase (CAT), and 3 non-enzymatic indexes: total polyphenols, total flavonoids and vitamin C) were determined and the qualities of chestnut germplasms were evaluated through subordinate function and factor analysis (with or without antioxidant enzymes) to screen excellent germplasm resources. [Result] Among these germplasms, the average weight of single fruit was 9.65 g, the largest was TPZ (12.51 g), and the smallest was QTC (7.88 g); the average water content was 48.85%, the highest was TPZ (51.59%), and the lowest was LJT (45.95%); the average value of starch content was 46.81%, LJT was the highest (53.69%), and JCY-1 was the lowest (38.28%); the average value of soluble sugar content was 7.96%, ZQ1 was the highest (11.62%), and YHZ was the lowest (4.51%); the average value of SOD activity was 1 012.37 U·g⁻¹, the highest was TPZ (1 310.42 U·g⁻¹), and the lowest was ZQ1 (717.40 U·g⁻¹); the average value of POD activity was 4 168.67 U·g⁻¹, JIH was the highest (5 965.33 U·g⁻¹), and JCY-3 was the lowest (3 009.33 U·g⁻¹). [Conclusion] Regardless of whether four antioxidant enzymes were used or not in the comprehensive evaluation ranking, the top one was QX107, followed by QL3113, QX3113, and HHZ20. In addition to the above three cultivars, ZJ2 and ZQ1 could be used as candidate elite germplasms for further test. The antioxidant enzymes SOD, POD, CAT and PPO could be considered as the evaluation indices of chestnut germplasms in future.

Keywords: chestnut; nutrient; antioxidant enzyme; factor analysis; comprehensive evaluation

(责任编辑: 徐玉秀)