网络出版时间:2025-10-31 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.04.007

不同山药种类间褐变、表型性状与氧化酶活性的差异分析

文思伽,辜夕容,徐诗蕊,邓杨宵,陈东梅,郑铠澎,唐浠凯,敖宇杰,杨寿溢
(西南大学 资源环境学院,重庆 400715)

[摘 要] 【目的】探讨10种山药褐变、表型性状与氧化酶活性的差异,为选育和培育无褐变或低褐变山药品种提供依据。【方法】以紫山药、灵芝山药、白玉山药、金秤砣山药、佛手山药、小白嘴山药、铁棍山药、瑞昌山药、麻山药和细毛山药10种褐变程度不同的山药为材料,检测山药的褐变指数、表型性状与氧化酶活性等性状。【结果】不同品种山药块茎褐变指数的变异系数为40.00%,表型性状和氧化酶活性的变异系数在10.03%~148.65%,绝大多数指标的变异系数在40.00%以上,具有较高选择潜力。相关性分析发现,山药块茎褐变指数与表皮厚、中部周长、端部周长、MDA含量、POD活性、PPO活性、APX活性间呈显著正相关,与中部须根数、端部须根数、表皮白度、内皮层白度、切片纤维数间呈显著负相关。主成分分析从21个性状中提取出5个主成分,其累计方差贡献率为90.627%;10种山药的综合得分为-4.135~1.786,综合得分由高到低依次为:瑞昌山药、铁棍山药、佛手山药、麻山药、小白嘴山药、细毛山药、白玉山药、灵芝山药、金秤砣山药、紫山药。聚类分析将10种山药划分为3大类群。所得结果与实际观测结果基本一致,可将其运用于山药低褐变品种的选育。【结论】在山药育种中,选择块茎细长、须根多、表皮薄、肉质细腻、色泽润白、POD和PPO活性低、APX活性高的种质资源,以培育出低褐变或无褐变的山药品种。

[关键词] 山药;褐变;表型性状;氧化酶活性;品种改良
[中图分类号] S539 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)04-0052-11

Differences in browning, phenotypic characteristics and oxidase activities among different yam varieties

WEN Sijia, GU Xirong, XU Shirui, DENG Yangxiao, CHEN Dongmei,
ZHENG Kaipeng, TANG Xikai, AO Yujie, YANG Shouyi
(*College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to elucidate the variations in browning, phenotypic characteristics, and oxidase activities across ten distinct yam (*Dioscorea opposita* spp.) varieties, providing a scientific foundation for the development and selection of non-browning or low-browning yam cultivars. 【Method】 Ten yam cultivars with differential browning levels, including Purple Yam, Lingzhi Yam, Baiyu Yam, Golden Baluster Yam, Buddha Hand Yam, Xiaobaizui Yam, Iron Stick Yam, Ruichang Yam, Ma Yam, and Fine Hair Yam, were analyzed for browning index, phenotypic characteristics, and oxidase activities. 【Result】 The coefficient of variation for the browning index of yam tubers across different varieties was 40.00%, while the coefficient of variation for phenotypic characteristics and oxidase activities ranged from 10.03% to 148.65%, with the majority of indices

[收稿日期] 2025-01-03 [修回日期] 2025-03-05
[基金项目] 重庆市科技兴林项目(2021-6)
[作者简介] 文思伽(2002-),女,四川射洪人,硕士,主要从事生态经济型植物的筛选与高效培育、林产品加工利用研究。E-mail:wensijia11@163.com
[通信作者] 辜夕容(1973-),女,四川邻水人,教授,博士,博士生导师,主要从事生态经济型植物的筛选与高效培育、林产品加工利用研究。E-mail:gxr0956@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

exhibiting coefficients of variation exceeding 40.00%. This indicated high selection potential. Correlation analysis revealed that the browning index of yam tubers was significantly positively correlated with epidermal thickness, mid-tuber circumference, distal circumference, MDA content, POD activity, PPO activity, and APX activity. Conversely, it was significantly negatively correlated with the number of mid-tuber fibrous roots, the number of distal fibrous roots, epidermal whiteness, endothelial whiteness, and the number of sliced fibers. Principal component analysis extracted five principal components from 21 traits, accounting for a cumulative variance contribution rate of 90.627%. The comprehensive scores of the ten yam varieties ranged from −4.135 to 1.786, ranked in descending order as follows: Ruichang Yam, Iron Stick Yam, Buddha Hand Yam, Ma Yam, Xiaobaizui Yam, Fine Hair Yam, Baiyu Yam, Lingzhi Yam, Golden Baluster Yam, and Purple Yam. Cluster analysis categorized the ten yam varieties into three major groups. These results aligned with empirical observations, demonstrating applicability for breeding low-browning yam varieties.【Conclusion】For breeding low-browning or non-browning yam cultivars, germplasm selection should prioritize tubers with elongated shape, numerous roots, thin skin, fine-textured flesh, white color, low POD and PPO activities, and high APX activity.

Key words: yam; browning; phenotypic characteristics; oxidase activity; varietal improvement

山药（*Dioscorea opposita* Thunb.）是薯蓣科（Dioscoreaceae）薯蓣属（*Dioscorea*）的一年生或多年生缠绕藤本植物，块茎富含淀粉、多糖、尿囊素、薯蓣皂苷、黏液蛋白等多种营养和功能性成分，是重要的药食同源作物，在我国东北、中部、东南、西南等地均有大面积种植。山药鲜品含水率超过70%，加上皮薄等特征导致其易损伤、腐烂，难以长时间储存。将山药加工成鲜切片、干片、干粉、粉丝等制品，不仅能扩大市场消费面和消费渠道，还能解决山药淡季可用性问题。然而山药块茎加工利用中的削皮、切分、破碎、加热等过程常引发褐变，影响产品色泽、外观、风味及营养和功能，甚至产生对人体健康有潜在危害的丙烯酰胺、杂环胺和5-羟甲基糠醛等产物[1-2]，严重降低了山药的经济价值、食用价值和产品功效。因此褐变的预防和控制已成为山药加工利用中亟须解决的难题。山药褐变主要由酶促褐变与非酶促褐变引起。在山药加工中，去皮、切分、破碎等步骤会破坏细胞结构，导致多酚等底物暴露在空气中，在多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO）和过氧化物酶（peroxidase，POD）的作用下氧化成醌类而引发酶促褐变，而过氧化氢酶（catalase，CAT）、抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）等抗氧化酶具有清除活性氧（reactive oxygen species，ROS）、减轻膜脂过氧化反应以抑制褐变的作用[3]。此外，热处理时山药中多糖、蛋白质、抗坏血酸等物质还可能发生美拉德反应、焦糖化反应及多元酚氧化缩合反应等导致非酶促褐变[4-5]。综上所述，现有的山药褐变防控方法中以减少底物与氧气接触、抑制PPO和POD活性、降低反应温度等为主[6-7]，如涂膜[8]、活性包装[9]、预煮[10]、降温[9]、等离子体[9]等处理。这些方法虽能在一定程度上抑制山药褐变，但仍存在投资成本较高、操作不便以及营养成分流失等问题，而且多数措施仍会在加工后期因酶重新激活而再度引发褐变[11]。

山药的褐变程度与品种密切相关，如能选育出低褐变或无褐变的山药品种，将能从根本上解决褐变难题[10]。EKAETTE等[12]对山药遗传多样性和种群结构的研究发现，评估的山药种质之间存在高度变异性，所有表型性状都能有效区分不同山药，且基于表型性状的分类与基于DArT-Seq标记的分类具有一定相关性，揭示了遗传多样性以及表型性状在山药育种中的重要性；ADEJUMOBI等[13]研究发现，刚果（金）的6个山药品种氧化褐变的变异系数在基因型和表现型上均超过40%，说明选育抗氧化褐变的山药品种具有较大潜力，据此选育出低褐变的紫山药品种，进一步验证了遗传改良在减少褐变中的潜力；LEBOT等[14]进行了更大规模的品种筛选研究，提出可通过较低的皂苷、儿茶素等次生代谢物含量选育低褐变山药品种，并成功在来自多个国家和地区的388个紫山药品种和162个杂交种中选出多个低褐变品种。尽管研究者在选育低褐变山药品种方面取得了一定的进展，但传统选种手段仍存在育种时间长、工作量巨大等困难，亟需建立关于低褐变山药品种选育的指标体系。

中国是世界山药主产区之一，山药种类繁多，遗传资源丰富，品种间在块茎的形状、须根数、皮色、肉色、氧化酶活性、总皂苷和儿茶素含量等性状上均存在较大变异[14-16]，这为开展低褐变或无褐变

中国知网　https://www.cnki.net

山药品种选育提供了可能。为此,本研究选取了10种褐变程度存在差异的常见山药品种,检测分析了不同山药品种的表型性状和氧化酶活性,以找寻并建立无褐变或低褐变山药品种选育的指标体系,为选育和培育无褐变或低褐变山药品种提供基础理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

10种常见山药品种:紫山药(产地,江西安远。下同)、灵芝山药(云南文山)、白玉山药(广西贺州)、金秤砣山药(云南楚雄)、佛手山药(江西新绛)、小白嘴山药(河北蠡县)、铁棍山药(河南温县)、瑞昌山药(江西瑞昌)、麻山药(河北蠡县)和细毛山药(山东淄博),于2024年3月1日购自农贸市场。经预试验发现,10种山药褐变程度均存在差异。选取外观完整、粗细均匀、无机械损伤和病虫危害、成熟度基本一致的新鲜山药块茎各15株,置于4 ℃冰箱中避光贮藏备用。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 褐变指数(browning index, BI) 参照CHENG等[17]的方法,将山药切成5 mm的薄片,在20 ℃放置8 h后,采用色差仪读取山药切片表面白度(L)、红绿色度(a)、黄蓝色度(b)。参照NDIAYE等[18]的方法计算BI,BI=[100(x−0.31)]/0.172,其中x=(a+1.75L)/(5.645L+a−3.012b)。

1.2.2 长宽比和表皮厚 用游标卡尺测定切片的长径和短径,其比值为长宽比,用来表征山药形状;将山药块茎置于水浴锅中沸水浴30 min,自然冷却后撕下山药表皮,用游标卡尺测量其厚度,即表皮厚。

1.2.3 中部须根数和端部须根数 选取山药块茎中部和端部,统计单位面积的须根数。

1.2.4 块茎表皮、内皮层和块茎肉的色度指数 采用分层取样方法,避开栓质化表皮与周皮交界处,使用解剖刀沿块茎纵轴方向切取均匀区域表皮,然后切取周皮至维管束层之间的薄壁组织,进行内皮层的取样;块茎肉切取维管束层以内的中央薄壁组织即可[3]。每层组织分别切取3 cm×3 cm的方形薄片,取样后迅速用色差仪检测山药块茎内、外表皮和块茎肉色的L、a、b值。

1.2.5 切片纤维数 用1 cm^2的打孔器切取山药切片,显微镜下观测其纤维数量,用以表征山药肉质的细腻程度,单位面积纤维数量越多表示山药肉质越细腻。

1.2.6 中部周长和端部周长 检测块茎中段处周长和距端部5 cm处周长,用以评估山药块茎的粗细程度。

1.2.7 块茎密度 采用排水法测定块茎密度。

1.2.8 丙二醛含量 采用丙二醛(malondialdehyde,MDA)含量检测试剂盒(重庆博诺恒生物科技有限公司,中国)的硫代巴比妥酸法测定MDA含量。

1.2.9 氧化酶活性 采用PPO、POD、CAT和APX活性检测试剂盒(重庆博诺恒生物科技有限公司,中国)测定PPO、POD、CAT和APX活性。

上述各项指标设置3个重复,取平均值进行数据处理与分析。

1.3 数据处理

试验数据采用Microsoft excel 2019整理、运算和制表,用IBM Statistics SPSS 26.0进行数据分析。对所得数据进行Pearson相关分析,KMO和巴特利特检验数据的显著性后进行主成分分析。用系统聚类法对10种山药进行聚类分析。

2 结果与分析

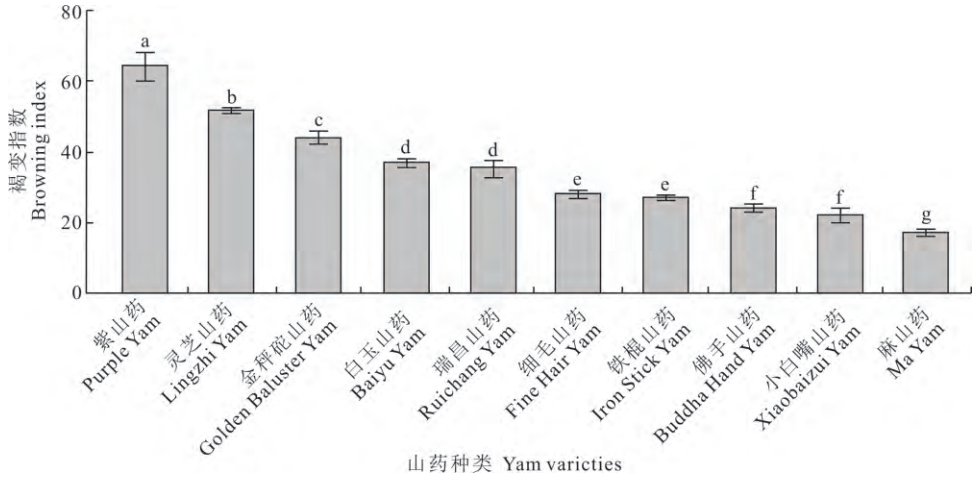
2.1 不同种类山药的褐变指数

由图1可以看出,不同种类山药块茎的BI差异显著,变异系数为40.00%,褐变指数由高到低依次为:紫山药 > 灵芝山药 > 金秤砣山药 > 白玉山药 ≈ 瑞昌山药 > 细毛山药 ≈ 铁棍山药 > 佛手山药 ≈ 小白嘴山药 > 麻山药。

2.2 不同种类山药的表型性状及氧化酶活性

由表1可以看出,不同种类山药的表型性状和氧化酶活性存在较大差异,变异系数在10.03%~148.65%。在山药表型性状中,块茎肉色红绿色度变异系数最大,为148.65%;其次为表皮厚、端部须根数、中部须根数、内皮层红绿色度、块茎肉色黄蓝色度、内皮层褐变指数、切片纤维数、内皮层黄蓝色度和长宽比,变异系数均大于40.00%;块茎密度的变异系数最小,为10.03%。与氧化酶活性相关的指标中,MDA含量及POD、CAT、PPO和APX活性的变异系数均超过45.00%。可见,除块茎密度比较稳定而不适合作进一步选择的指标外,其余性状均存在较大变异,对其作进一步筛选和挖掘能获得较高的选择效果。

中国知网 https://www.cnki.net



图柱上标不同小字字母表示差异显著（$P<0.05$）。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among yam varieties at $P<0.05$.

图 1　不同种类山药的褐变指数

Fig. 1　Browning index of different yam varieties

表 1　不同种类山药表型性状及氧化酶活性的差异

Table 1　Differences in phenotypic characteristics and oxidase activities among different yam varieties

指标 Indicator	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	均值 Mean	极差 Range	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
长宽比 Aspect ratio	1.00	3.00	1.32	2.00	0.55	41.43
表皮厚/mm Epidermal thickness	0.10	2.56	0.55	2.46	0.70	127.09
中部须根数 Number of fibrous roots at mid-tuber	2.00	26.00	8.03	24.00	5.68	70.68
端部须根数 Number of fibrous roots at distal end	1.00	21.00	7.63	20.00	5.46	71.46
表皮白度 Epidermal *L*	23.40	52.50	42.06	29.10	9.19	21.85
表皮红绿色度 Epidermal *a*	5.90	15.30	11.93	9.40	2.98	25.00
表皮黄蓝色度 Epidermal *b*	8.90	29.30	21.67	20.40	6.65	30.66
表皮褐变指数 Epidermal BI	59.97	113.80	89.25	53.83	17.77	19.91
内皮层白度 Endodermis *L*	13.70	81.60	64.28	67.90	19.07	29.67
内皮层红绿色度 Endodermis *a*	2.00	17.80	7.38	15.80	5.12	69.28
内皮层黄蓝色度 Endodermis *b*	0.10	43.60	23.23	43.50	11.39	49.03
内皮层褐变指数 Endodermis BI	22.14	132.19	58.48	110.05	37.06	63.37
块茎肉色白度 Tuber flesh *L*	39.00	83.50	75.63	44.50	12.81	16.94
块茎肉色红绿色度 Tuber flesh *a*	1.40	28.20	5.22	26.80	7.76	148.65
块茎肉色黄蓝色度 Tuber flesh *b*	−11.80	25.60	14.68	37.40	9.47	64.49
块茎肉色褐变指数 Tuber flesh BI	16.31	48.31	25.96	32.00	7.10	27.36
切片纤维数 Number of sliced fibers	11.00	69.00	35.27	58.00	17.90	50.75
中部周长/cm Mid-tuber circumference	6.50	28.40	16.86	21.90	6.56	38.91
端部周长/cm Distal circumference	6.30	20.50	12.06	14.20	3.91	32.46
块茎密度/($g \cdot cm^{-3}$) Tuber density	0.68	1.10	0.94	0.42	0.09	10.03

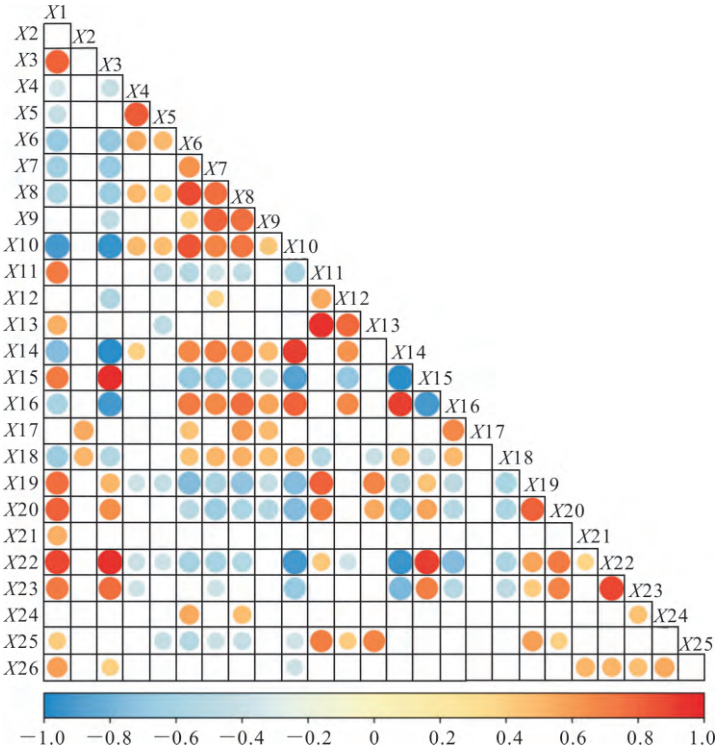
中国知网　https://www.cnki.net

表 1(续) Table 1(continued)

指标 Indicator	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	均值 Mean	极差 Range	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
MDA 含量/(nmol·g^{-1}) MDA content	0.50	7.04	1.92	6.53	1.71	88.92
POD 活性/(U·g^{-1}) POD activity	126.02	782.28	315.44	656.26	232.20	73.61
CAT 活性/(U·g^{-1}) CAT activity	18.51	489.21	192.71	470.70	147.99	76.79
PPO 活性/(U·g^{-1}) PPO activity	38.92	579.51	227.18	540.59	146.00	64.27
APX 活性/(U·g^{-1}) APX activity	0.92	3.84	1.82	2.93	0.83	45.69

2.3 山药褐变指数、表型性状和氧化酶活性间的相关性

由图 2 可以看出,山药 BI、表型性状和氧化酶活性间均存在一定程度的相关性。山药块茎 BI 与表皮厚、中部周长、端部周长、MDA 含量、POD 活性、PPO 活性、APX 活性间呈显著正相关,而与中部须根数、端部须根数、表皮白度、内皮层白度、切片纤维数间呈显著负相关。因此可运用这些指标对山药褐变进行相关选择。



X1. 褐变指数;X2. 长宽比;X3. 表皮厚;X4. 中部须根数;X5. 端部须根数;X6. 表皮白度;X7. 表皮红绿色度;X8. 表皮黄蓝色度;X9. 表皮褐变指数;X10. 内皮层白度;X11. 内皮层红绿色度;X12. 内皮层黄蓝色度;X13. 内皮层褐变指数;X14. 块茎肉色白度;X15. 块茎肉色红绿色度;X16. 块茎肉色黄蓝色度;X17. 块茎肉色褐变指数;X18. 切片纤维数;X19. 中部周长;X20. 端部周长;X21. 块茎密度;X22. MDA 含量;X23. POD 活性;X24. CAT 活性;X25. PPO 活性;X26. APX 活性。图中红色和蓝色圆形分别表示显著正相关和负相关($P<0.05$)。

X1. Browning index; X2. Aspect ratio; X3. Epidermal thickness; X4. Number of fibrous roots at mid-tuber; X5. Number of fibrous roots at distal end; X6. Epidermal L; X7. Epidermal a; X8. Epidermal b; X9. Epidermal BI; X10. Endodermis L; X11. Endodermis a; X12. Endodermis b; X13. Endodermis BI; X14. Tuber flesh L; X15. Tuber flesh a; X16. Tuber flesh b; X17. Tuber flesh BI; X18. Number of sliced fibers; X19. Mid-tuber circumference; X20. Distal circumference; X21. Tuber density; X22. MDA content; X23. POD activity; X24. CAT activity; X25. PPO activity; X26. APX activity. Red and blue circles in the figure indicate significant positive and negative correlations, respectively ($P<0.05$).

图 2 山药褐变指数、表型性状和氧化酶活性间的相关性

Fig. 2 Intercorrelations among yam browning index, phenotypic traits and oxidase activities

由图 2 还可以看出,在山药表型性状与氧化酶活性间,长宽比与块茎肉色 BI 和切片纤维数间呈显著正相关;表皮厚与 MDA 含量、POD 活性和 APX 活性间呈显著正相关,而与表皮色度(L、a、b)、切片纤维数间呈显著负相关;中部须根数与表皮白度、内皮层白度、块茎肉色白度间呈显著正相关,而与

中国知网 https://www.cnki.net

块茎中部周长、MDA 含量、POD 活性间呈显著负相关；端部须根数与表皮白度、内皮层白度间呈显著正相关，而与中部周长、MDA 含量和 PPO 活性间呈显著负相关；块茎肉色白度与切片纤维数间呈显著正相关，而与中部周长、MDA 含量和 POD 活性间呈显著负相关；切片纤维数与中部周长、MDA 含量和 POD 活性间呈显著负相关；中部周长和端部周长均与 MDA 含量、POD 活性、PPO 活性间呈显著正相关；MDA 含量与 POD 活性、APX 活性间呈显著正相关；CAT 活性与 APX 活性间呈显著正相关。

2.4　不同山药品种的综合评价

2.4.1　主成分分析　将山药表型性状与氧化酶活性中变异系数较大的 21 个性状进行主成分分析，提取出 5 个主成分（表 2），其累计方差贡献率为 90.627%，代表全部性状的绝大部分信息，可将它们作为综合指标。

表 2　山药表型性状与氧化酶活性的主成分分析

Table 2　Principal component analysis of yam phenotypic traits and oxidase activities

指标 Indicator	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	主成分 4 Principal component 4	主成分 5 Principal component 5
长宽比 Aspect ratio	0.145	−0.078	−0.394	0.420	0.747
表皮厚 Epidermal thickness	−0.935	0.315	−0.045	0.052	−0.060
中部须根数 Number of fibrous roots at mid-tuber	0.503	0.363	0.257	−0.590	0.377
端部须根数 Number of fibrous roots at distal end	0.451	0.476	0.042	−0.628	0.272
表皮白度 Epidermal *L*	0.823	0.348	0.297	0.159	0.089
表皮红绿色度 Epidermal *a*	0.760	0.015	0.113	0.319	−0.306
表皮黄蓝色度 Epidermal *b*	0.802	0.300	0.317	0.287	0.167
内皮层白度 Endodermis *L*	0.977	0.017	−0.004	−0.028	−0.058
内皮层红绿色度 Endodermis *a*	−0.553	−0.604	0.535	−0.035	0.064
内皮层黄蓝色度 Endodermis *b*	0.340	−0.673	0.622	0.008	−0.022
块茎肉色白度 Tuber flesh *L*	0.922	−0.328	0.150	−0.068	−0.073
块茎肉色红绿色度 Tuber flesh *a*	−0.879	0.390	−0.202	0.021	0.083
块茎肉色黄蓝色度 Tuber flesh *b*	0.849	−0.286	0.291	0.211	0.153
切片纤维数 Number of sliced fibers	0.625	−0.005	−0.398	0.291	0.356
中部周长 Mid-tuber circumference	−0.767	−0.494	0.171	−0.149	0.149
端部周长 Distal circumference	−0.793	−0.143	0.353	0.014	0.225
MDA 含量 MDA content	−0.915	0.277	0.156	0.177	0.043
POD 活性 POD activity	−0.709	0.372	0.293	0.447	0.091
CAT 活性 CAT activity	0.073	0.545	0.662	0.320	−0.080
PPO 活性 PPO activity	−0.332	−0.764	0.070	0.002	0.306
APX 活性 APX activity	−0.302	0.432	0.687	−0.140	0.198
特征值 Eigenvalue	10.123	3.381	2.585	1.643	1.299
方差贡献率/% Variance contribution rate	48.206	16.100	12.311	7.823	6.185
累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	48.206	64.307	76.618	84.441	90.627

由表 2 可知，主成分 1 中表皮的白度、红绿色度和黄蓝色度，内皮层白度，块茎的肉色白度和黄蓝色度，切片纤维数具有较大的正系数，而表皮厚、块茎肉色红绿色度、中部和端部粗度、MDA 含量和 POD 活性具有较大的负系数，其值越高表示山药的块茎细长、表皮薄、肉质洁白细腻，且质膜透性和 POD 活性均较低，山药的外观品质和抗氧化能力均较高。主成分 2 中内皮层的红绿色度和黄蓝色度及

中国知网　https://www.cnki.net

PPO活性具有较大的负系数,其值高则表示山药内皮层颜色灰暗且PPO活性低,山药内皮层色泽较差,且抗氧化能力相对较弱。主成分3中CAT和APX活性具有较大的正系数,其值高则表示山药具有较强的抗氧化能力。主成分4的中部和端部须根数具有较大的负系数,其值高则表示山药表面的须根数少。主成分5中长宽比具有较大的正系数,其值高表示山药块茎偏长形。

2.4.2 综合评价 由主成分载荷矩阵与对应特征值算数平方根的比值可得主成分系数矩阵,与标准化数据相乘后可计算5个主成分Y_1~Y_5的得分。将方差贡献率归一化处理后得到各主成分的权重,进而得到综合得分的函数表达式为:$Y=0.532Y_1+0.178Y_2+0.136Y_3+0.086Y_4+0.068Y_5$。由综合得分的函数表达式计算10种山药的各主成分得分与综合得分并排序,结果见表3。

表3 10种山药的主成分得分及排序

Table 3 Principal component scores and rankings of 10 yam varieties

山药种类 Yam varieties	Y_1		Y_2		Y_3		Y_4		Y_5		Y	
	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank	得分 Score	排序 Rank
紫山药 Purple Yam	−8.204	10	2.141	1	−1.020	9	−0.215	4	0.074	5	−4.135	10
灵芝山药 Lingzhi Yam	−1.533	8	−0.178	7	3.366	1	2.104	1	−0.314	6	−0.230	8
金秤砣山药 Golden Baluster Yam	−2.182	9	−4.121	10	−0.340	4	−0.959	9	0.356	3	−1.999	9
白玉山药 Baiyu Yam	0.447	7	−1.962	9	0.735	3	−0.664	7	0.335	4	−0.046	7
瑞昌山药 Ruichang Yam	2.269	2	2.037	2	2.258	2	−1.932	10	1.106	2	1.786	1
细毛山药 Fine Hair Yam	1.170	6	−0.479	8	−0.921	7	−0.467	6	−1.839	10	0.247	6
铁棍山药 Iron Stick Yam	2.307	1	0.348	5	−0.472	5	1.473	3	−1.029	9	1.282	2
佛手山药 Buddha Hand Yam	2.015	4	0.064	6	−1.971	10	1.617	2	2.384	1	1.117	3
小白嘴山药 Xiaobaizui Yam	1.571	5	1.046	4	−0.642	6	−0.268	5	−0.591	8	0.871	5
麻山药 Ma Yam	2.139	3	1.104	3	−0.993	8	−0.690	8	−0.481	7	1.107	4

由表3可知,10种山药的综合得分为−4.135~1.786,综合得分由高到低依次为:瑞昌山药、铁棍山药、佛手山药、麻山药、小白嘴山药、细毛山药、白玉山药、灵芝山药、金秤砣山药、紫山药。10种山药中,瑞昌山药、细毛山药、铁棍山药、佛手山药、小白嘴山药和麻山药的主成分1和综合得分值均为正,且高低排列顺序近似,它们的外观品质和抗氧化能力均较高;紫山药、灵芝山药、金秤砣山药和白玉山药的综合得分值均为负数,主成分1的得分值高低顺序与综合得分值一致,它们的外观品质和抗氧化能力均较差。

2.5 不同山药品种的聚类分析

10种山药的系统聚类见图3。

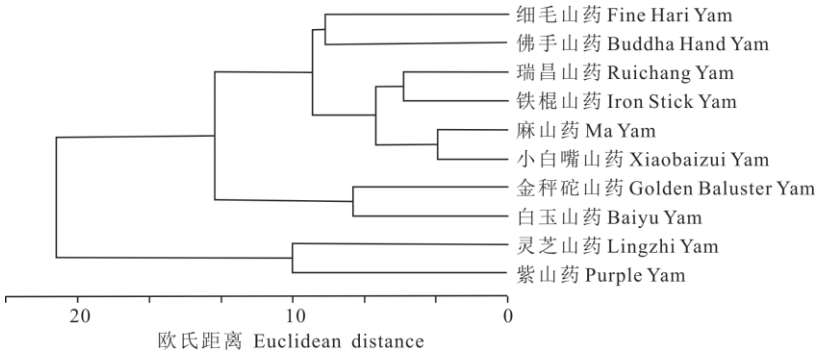


图3 10种山药的系统聚类

Fig. 3 Systematic clustering of ten yam varieties

中国知网 https://www.cnki.net

由图3可以看出，在欧氏距离为10时可将10种山药划分为3大类群：小白嘴山药、麻山药、铁棍山药、瑞昌山药、佛手山药和细毛山药为第1类群，白玉山药和金秤砣山药为第2类群，灵芝山药和紫山药为第3类群。结合3大类群的主成分值来看，它们的综合得分排列顺序依次为第1类群＞第2类群＞第3类群，与主成分1的得分排列顺序一致，说明3个类群的区别主要来源于主成分1，即它们之间的外观品质和抗氧化能力差异是这10种山药分类的主要依据。

3　讨　论

3.1　山药褐变与表型性状间的关系

山药块茎的褐变程度与部分表型性状密切相关。本研究中，不同山药品种间表型性状的变异系数为10.03%～148.65%；表型性状中，表皮厚、中部周长、端部周长、中部须根数、端部须根数、表皮白度、内皮层白度、切片纤维数均与BI间有显著正或负相关关系，为探索BI与表型性状间的关系及进一步的相关选择提供了依据。本研究发现，山药品种间的表型性状存在较大变异，且与BI密切相关，可依据这些性状初步筛选出低褐变或无褐变品种。陈阳等[19]研究也发现，山药品种间块茎形状、块茎直径、块茎表皮色、表面须根数和褐变指数等性状存在显著变异，可据此选育山药优良品种，与本研究结果一致。PADHAN等[20]对来自印度的8种野生山药和栽培山药的研究发现，山药块茎长度和宽度等性状在种间差异显著且具有较高的遗传力；吴金平等[21]对从我国山药主产区引进的66份种质资源的研究同样也发现，山药块茎形状存在较大差异，且具有较高的遗传多样性指数：说明此类分化由遗传变异主导且块茎形状是山药种质资源分类的重要依据。本研究中，山药长宽比与BI无显著相关性，这种差异可能是由山药种质、地理来源以及栽培环境不同引起的。汪生林等[22]研究发现，参薯（*Discorea alata* L.）块茎横径变异系数达到了163.80%，而本研究中表示块茎粗度的端部周长和中部周长的变异系数显著更低，这可能受山药和参薯的种间差异影响。此外，本研究还发现，块茎细长、须根多、表皮薄、肉质细腻、色泽润白的山药不易褐变，这可能是因为山药块茎组织结构致密，减少了切割后细胞损伤引发的褐变。因此未来研究中可重点关注具有这些表型的种质资源，以选育出低褐变或无褐变的山药种类。

3.2　山药褐变与氧化酶活性间的关系

POD和PPO是酶促褐变的必要条件，其活性高低直接关系到褐变发生程度[23]。本研究中，山药品种间POD和PPO的变异系数在60%以上，且均与BI间呈显著正相关。在笋[24]、柿[25]、苹果[26]的研究中发现，一定范围内POD和PPO活性越高，褐变程度越高，与本研究结果一致。本研究中，山药BI与POD活性的相关性强于PPO活性；GRAHAM-ACQUAAH等[27]对2个白山药栽培品种的研究同样发现，与PPO活性相比，褐变程度与POD活性的关系更紧密；而PENG等[28]研究发现PPO是引起白山药褐变的主要氧化酶，推测山药品种不同应是造成此差异的主要原因。酚类物质是PPO作用底物，不同山药块茎内部酚类物质种类和含量存在差异，这会影响PPO活性与褐变程度的相关性。当PPO活性受抑制时，POD经由过氧化氢介导的酚类氧化途径成为主导[29]。在不同品种山药褐变过程中，POD和PPO占据不同的主导地位，也可能是因为环境-基因互作对其氧化途径进行了动态重塑[30]。本研究中，POD和PPO活性与山药BI呈显著正相关，因此选择低褐变山药时应重点关注POD和PPO活性低的种质资源。

CAT和APX在抗氧化系统中起清除ROS的作用，是保护细胞膜的关键酶[10]。CAT是一种内源性过氧化氢清除酶[10]。APX是一种以抗坏血酸为电子供体的专一性很强的过氧化物酶[31]，一般不直接参与褐变反应[32]，但可清除H_2O_2等活性氧物质，并且APX参与了多种信号传导途径，有助于减轻氧化胁迫对植物细胞的损伤而间接影响褐变程度。因此，CAT和APX不仅可作为山药抗氧化系统的重要部分发挥作用，还可能间接影响与BI相关的生理过程。本研究中，山药品种间CAT和APX活性的变异系数在45%以上，但仅APX活性与BI呈显著正相关，表明APX在抵御褐变过程中发挥了重要作用。COELHO JÚNIOR等[4]研究结果表明，CAT、APX活性与BI之间存在一定的关联，APX活性表现与本研究结果相同，而CAT活性表现与本研究结果不同，这可能是试验材料、环境条件不同导致的差异。APX活性较低时胞内H_2O_2等活性氧物质积累增多，可能加剧细胞膜的氧化损伤和脂质过氧化反应，进而促进褐变，APX活性升高则有助于抑制山药褐变[10]。本研究中，CAT活性与BI无显

中国知网　https://www.cnki.net

著相关性,可能是CAT在细胞受到损伤后发挥清除过氧化氢的作用产生了氧化应激反应[33],与褐变的发生无直接关联。

3.3 低褐变山药选种指标的确立

应用主成分分析和聚类分析对供试材料进行综合评价和比选,是良种选育中广泛使用且行之有效的方法[34-36]。本研究主成分分析综合得分结果显示,瑞昌山药、铁棍山药、佛手山药、麻山药、小白嘴山药和细毛山药得分排名前6,综合抗褐变能力相对较高。聚类分析在欧氏距离为10时将10种山药划分为3个类群,综合得分排名前6的山药品种均属于第1类群。对比分析后发现,综合评分结果与BI基本一致,证实建立的综合评分模型可用于山药无褐变或低褐变品种选育。在马铃薯[37]、苹果等[38]品种选育中,主成分分析结果和综合得分模型同样与实际观测结果相互印证,证明建立的指标模型适用于马铃薯、苹果等良种的选育。但也有研究表明[39],主成分分析结果与实际结果存在一定的偏差,建议用专家打分法给予修正。在山药低褐变品种选育中,除本研究所测定的指标外,尚有与褐变密切相关的酚类底物等尚未检测,未来可开展这方面研究补充完善,所得结果可能会与主成分分析结果有一定的偏差,可采用专家打分等方法进行修正,也可在基于表型性状的初步选择后辅以分子标记技术,以建立更准确的指标模型应用于低褐变山药品种的选育。

4 结 论

山药种类间的褐变程度、表型性状与氧化酶活性存在较大差异,变异系数在10.03%~148.65%。绝大多数指标的变异系数在40.00%以上。山药块茎BI与表皮厚、中部周长、端部周长、MDA含量、POD活性、PPO活性、APX活性间呈显著正相关,而与中部须根数、端部须根数、表皮白度、内皮层白度、切片纤维数间呈显著负相关。主成分分析结果显示,主成分1表示山药的外观品质和抗氧化特征,主成分2表示山药内皮层色泽与PPO活性,主成分3表示山药CAT活性与APX活性,主成分4表示山药表面须根数,主成分5表示山药块茎形状。聚类分析在欧式距离为10时将10种山药划分为3大类群。在山药育种中,可重点关注块茎细长、须根多、表皮薄、肉质细腻、色泽润白、POD和PPO活性低、APX活性高的种质资源,以选育出低褐变或无褐变的山药品种。

[参考文献]

[1] LI Y, JI S, XU T, et al. Chinese yam (*Dioscorea*): nutritional value, beneficial effects, and food and pharmaceutical applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 134: 29-40.

[2] 车曦,高琳,张仁堂,等. 果蔬发酵黑化褐变机制及晚期糖基化产物调控研究进展[J]. 食品与发酵工业,2024,50(10):381-387.
CHE X, GAO L, ZHANG R T, et al. Research progress on mechanism of blackening and browning in fruit and vegetable fermentation and regulation of advanced glycosylation products [J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(10): 381-387.

[3] DOS SANTOS MORAIS M A, FONSECA K S, DE MEDEIROS R A, et al. Use of the abrasion technique in minimal processing as an alternative to increase purchase acceptability and minimize browning in yam[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 121-131.

[4] COELHO JÚNIOR L F, FERREIRA-SILVA S L, VIEIRA M R, et al. Darkening, damage and oxidative protection are stimulated in tissues closer to the yam cut, attenuated or not by the environment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(1): 334-342.

[5] ZHAO L, WANG D, MA Y, et al. Yellow pigment formation, pigment composition, and quality of fresh-cut yam (*Dioscorea opposita*) slices[J]. RSC Advances, 2020, 10(2): 1104-1113.

[6] DADALı G, KıLıÇ APAR D, ÖZBEK B. Color change kinetics of okra undergoing microwave drying[J]. Drying Technology, 2007, 25(5): 925-936.

[7] QUAN H, CAI Y X, LU Y Z, et al. Effect of microwave treatments combined with hot-air drying on phytochemical profiles and antioxidant activities in lily bulbs (*Lilium lancifolium*)[J]. Foods, 2023, 12(12): 2344.

[8] HUANG H H, HUANG C X, YIN C, et al. Preparation and characterization of β-cyclodextrin-oregano essential oil microcapsule and its effect on storage behavior of purple yam[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(13): 4849-4857.

[9] 黄彭,丁捷,胡晓敏,等. 鲜切果蔬物理防褐保鲜的研究进展[J]. 园艺学报,2021,48(6):1217-1232.
HUANG P, DING J, HU X M, et al. Advances in fresh-cut fruit and vegetables based on physical anti-browning technology [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(6): 1217-1232.

[10] 辜夕容,邓杨宵,陈东梅,等. 山药加工中的褐变原因及防控研究进展[J]. 食品与发酵工业,2024,50(20):385-392.
GU X R, DENG Y X, CHEN D M, et al. Research progress in causes and prevention techniques of browning in yam processes [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(20): 385-392.

[11] AKISSOE N, MESTRES C, HOUNHOUIGAN J, et al. Biochemical origin of browning during the processing of fresh yam (*Dioscorea* spp.) into dried product[J]. J Agric Food Chem,

中国知网 https://www.cnki.net

2005，53(7)：2552-2557.

[12] EKAETTE E，NWOFIA E，OKOCHA P，et al. Exploring the genetic diversity and population structure of aerial yams (*Dioscorea bulbifera* L.) DArT-seq and agronomic traits[J]. PLoS One，2024，19(8)：e0306631.

[13] ADEJUMOBI I I，AGRE P A，ONAUTSHU D O，et al. Assessment of the yam landraces (*Dioscorea* spp.) of DR Congo for reactions to pathological diseases，yield potential，and tuber quality characteristics[J]. Agriculture，2022，12(5)：599.

[14] LEBOT V，MALAPA R，ABRAHAM K，et al. Secondary metabolites content may clarify the traditional selection process of the greater yam cultivars (*Dioscorea alata* L.)[J]. Genetic Resources and Crop Evolution，2018，65(6)：1699-1709.

[15] 唐金蕾，陈媛媛，程代，等. 复合保鲜液对鲜切山药的护色保鲜作用[J]. 食品与发酵工业，2020，46(3)：212-220.
TANG J L，CHEN Y Y，CHENG D，et al. Effect of compound preservation liquid on color protection and preservation of fresh-cut yam[J]. Food and Fermentation Industries，2020，46(3)：212-220.

[16] 赵圆，张艳芳，杨帆，等. 基于形态标记和AFLP标记的山药种质资源遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学，2023，51(6)：47-54.
ZHAO Y，ZHANG Y F，YANG F，et al. Genetic diversity analysis of yam germplasm resources based on morphological markers and AFLP markers[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2023，51(6)：47-54.

[17] CHENG H Y，DU H Y，ZUO X X，et al. Oxalic acid alleviates surface discoloration in fresh-cut yam by regulating enzymatic browning and bisdemethoxycurcumin synthesis[J]. LWT，2024，210：116836.

[18] NDIAYE C，XU S Y，WANG Z. Steam blanching effect on polyphenoloxidase，peroxidase and colour of mango (*Mangifera indica* L.) slices[J]. Food Chemistry，2009，113(1)：92-95.

[19] 陈阳，叶明辉，丛尧华，等. 福建省山药资源表型性状遗传多样性分析[J]. 中国蔬菜，2024(12)：48-54.
CHEN Y，YE M H，CONG Y H，et al. Genetic diversity on phenotypic traits of Chinese yam germplasms in Fujian[J]. China Vegetables，2024(12)：48-54.

[20] PADHAN B，MUKHERJEE A K，MOHANTY S K，et al. Genetic variability and inter species relationship between wild and cultivated yams (*Dioscorea* spp.)from Koraput，India based on molecular and morphological markers[J]. Physio-logy and Molecular Biology of Plants，2019，25(5)：1225-1233.

[21] 吴金平，矫振彪，郭凤领，等. 基于形态学标记的山药种质资源遗传多样性研究[J]. 中国野生植物资源，2017，36(1)：11-14.
WU J P，JIAO Z B，GUO F L，et al. Study on germplasm genetic diversity of yam based on morphological markers[J]. Chinese Wild Plant Resources，2017，36(1)：11-14.

[22] 汪生林，崔佳瑞，单楠，等. 我国南方地区参薯表型性状多样性分析[J/OL]. 江西农业大学学报，1-14[2025-04-17]. https://link. cnki. net/urlid/36. 1028. S. 20250407. 0855. 002.
WANG S L，CUI J R，SHAN N，et al. Analysis of the phenotypic character diversity of *Dioscorea alata* L. in Southern China[J/OL]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis，1-14 [2025-04-17]. https://link. cnki. net/urlid/36. 1028. S. 20250407. 0855. 002.

[23] 陈维宁，李旋，王文月，等. 桃酶促褐变机理与调控技术研究进展[J]. 食品科学，2024，45(7)：290-298.
CHEN W N，LI X，WANG W Y，et al. Research progress on the mechanism and regulation of enzymatic browning in peach fruit[J]. Food Science，2024，45(7)：290-298.

[24] 周成敏，陈凯鹏，黄文仕，等. 褪黑素延缓去壳黄甜笋木质化和褐变作用[J]. 食品工业科技，2024，45(22)：272-280.
ZHOU C M，CHEN K P，HUANG W S，et al. Effects of melatonin treatment on lignification and browning in bamboo shoots(*Acidosasa edulis*) without sheaths during cold storage [J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(22)：272-280.

[25] 韩卫娟，曹坤，傅建敏，等. 柿脱涩过程中褐变及相关酶活性的变化规律[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2021，49(10)：92-99.
HAN W J，CAO K，FU J M，et al. Browning and related enzyme activities in de-astringent treatment of persimmon[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2021，49(10)：92-99.

[26] 褚燕南，贾永华，岳海英，等. OPAL苹果果肉褐变延迟的生理机制研究[J]. 食品与发酵工业，2025，51(4)：264-270.
CHU Y N，JIA Y H，YUE H Y，et al. Physiological mechanism of delayed browning of OPAL apple pulp[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(4)：264-270.

[27] GRAHAM-ACQUAAH S，AYERNOR G S，BEDIAKO-AMOA B，et al. Spatial distribution of total phenolic content，enzymatic activities and browning in white yam (*Dioscorea rotundata*) tubers[J]. Journal of Food Science and Technology，2014，51(10)：2833-2838.

[28] PENG X Y，DU C，YU H Y，et al. Purification and characterization of polyphenol oxidase (PPO) from water yam (*Dioscorea alata*)[J]. CyTA-Journal of Food，2019，17(1)：676-684.

[29] ZHANG W，PAN Y，JIANG Y，et al. Advances in control technologies and mechanisms to treat peel browning in postharvest fruit[J]. Scientia Horticulturae，2023，311：111798.

[30] GATARIRA C，AGRE P，MATSUMOTO R，et al. Genome-wide association analysis for tuber dry matter and oxidative browning in water yam (*Dioscorea alata* L.)[J]. Plants，2020，9(8)：969.

[31] LI S C. Novel insight into functions of ascorbate peroxidase in higher plants：more than a simple antioxidant enzyme[J]. Redox Biology，2023，64：102789.

[32] 李桂峰. 苹果果肉褐变中细胞超微结构和氧化酶活性的变化[C]//2010 First International Conference on Cellular，Molecular Biology，Biophysics and Bioengineering，黑龙江齐齐哈尔.

中国知网　https://www.cnki.net

2010:37-40.
LI G F. Changes of cell ultrastructure and oxidative enzymes activities during browning of apple flesh[C]//2010 First International Conference on Cellular, Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering, Qiqihar, Heilongjiang. 2010:37-40.

[33] 刘聪,邓宇宏,刘选明,等. 过氧化氢酶在植物生长发育和胁迫响应中的功能研究进展[J]. 生命科学研究,2023,27(2):128-138.
LIU C, DENG Y H, LIU X M, et al. Research advances in the function of catalase in plant growth, development and stress response[J]. Life Science Research, 2023, 27(2):128-138.

[34] 曹雪莲,陈影,王迪,等. 中国皱木耳类群种质资源鉴定和表型性状分析[J]. 菌物学报,2024,43(12):20-33.
CAO X L, CHEN Y, WANG D, et al. Identification of germplasm resources and analysis of phenotypic traits of the *Auricularia delicata* complex in China[J]. Mycosystema, 2024, 43(12):20-33.

[35] 余帅,冯光燕,苏晓丽,等. 17份多花黑麦草品种(系)农艺性状与产量形成关系的多重分析[J]. 草地学报,2024,32(9):2862-2874.
YU S, FENG G Y, SU X L, et al. Multiple analyses of the relationship between agronomic traits and yield formation in 17 varieties/lines of *Lolium multiflorum*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9):2862-2874.

[36] 樊晓芸,郭素娟,李艳华,等. 板栗果实褐变度与总酚和总黄酮的相关性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(6):159-166.
FAN X Y, GUO S J, LI Y H, et al. Study on correlation between browning degree of chestnut fruit and total phenols and flavonoids[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(6):159-166.

[37] 陈明俊,罗小波,曹贞菊,等. 基于主成分分析和隶属函数法对不同马铃薯酶促褐变评价[J]. 中国蔬菜,2024(4):85-92.
CHEN M J, LUO X B, CAO Z J, et al. Comprehensive evaluation of enzymatic browning of different potatoes based on principal component analysis and membership function method[J]. China Vegetables, 2024(4):85-92.

[38] 李泰,孙君茂,黄家章,等. 不同产地'富士'苹果果实品质分析及评价[J]. 中国农业大学学报,2024,29(11):23-29.
LI T, SUN J M, HUANG J Z, et al. Fruit quality analysis and evaluation of 'Fuji' apples from different producing areas[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(11):23-29.

[39] 何超,李萌,李婷婷,等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2016,38(2):172-178.
HE C, LI M, LI T T, et al. Comparison and analysis of the four methods of determining weights in multi-objective comprehensive evaluation[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016, 38(2):172-178.

(责任编辑:屈李纯)

(上接第51页)

[24] 张俊华,黄华雨,丁启东,等. 河套平原盐碱化耕地土壤质量评价与障碍因素诊断[J]. 环境科学,2025,46(4):2320-2336.
ZHANG J H, HUANG H Y, DING Q D, et al. Soil quality evaluation and obstacle diagnosis of saline-alkali cultivated land in Hetao plain[J]. Environmental Science, 2025, 46(4):2320-2336.

[25] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京:农业出版社,1992.
National Soil Survey Office. Soil survey technology in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992.

[26] 陆其伟,脱云飞,冯永钰,等. 栗子坪自然保护区林分类型对土壤化学计量特征、微生物及其季节动态响应[J]. 水土保持学报,2024,38(5):285-295.
LU Q W, TUO Y F, FENG Y Y, et al. Response of forest stand types to soil stoichiometric characteristics, microorganisms and their seasonal dynamics in Liziping Nature Reserve[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5):285-295.

[27] 张向宁,王海燕,崔雪,等. 土壤pH与养分的空间异质性及土壤肥力分析:以内蒙古旺业甸林场为例[J]. 干旱区资源与环境,2023,37(7):127-136.
ZHANG X N, WANG H Y, CUI X, et al. Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients and soil fertility analysis: a case study of Wangyedian forest farm in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(7):127-136.

[28] 梁士楚,苑晓霞,卢晓明,等. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征[J]. 生态学报,2019,39(8):2752-2761.
LIANG S C, YUAN X X, LU X M, et al. Soil physico-chemical properties and distribution characteristics in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River, southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8):2752-2761.

[29] 于耀泓,刘悦,王艺颖,等. 鹅凰嶂山地雨林土壤阳离子交换量和交换性盐基离子分布特征[J]. 土壤通报,2022,53(6):1341-1349.
YU Y H, LIU Y, WANG Y Y, et al. Distribution of soil cation exchange capacity and exchangeable based cations in the E'huangzhang montane rain forest[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6):1341-1349.

[30] NEGIS H, ŞEKER C, GÜMÜS İ, et al. Establishment of a minimum dataset and soil quality assessment for multiple reclaimed areas on a wind-eroded region[J]. Catena, 2023, 229:107208.

[31] 李榕涛,卢丽兰,甘炳春,等. 海南主要益智生长区土壤养分调查与分析[J]. 中国农学通报,2011,27(13):130-134.
LI R T, LU L L, GAN B C, et al. Investigation and analysis of soil nutrients in the main growing area of *Alpinia oxyphylla* in Hainan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(13):130-134.

(责任编辑:李小平)

中国知网 https://www.cnki.net