

基于 DUS 测试性状的马铃薯品种遗传多样性及性状相关性分析

寇淑君 王瑶 付国庆 纪军建 霍阿红 陈令玮 左振兴

(张家口市农业科学院, 075000, 河北张家口)

摘要 为优化马铃薯 DUS 测试审查并为马铃薯新品种选育提供表型选择的指导, 依据马铃薯 DUS 测试指南, 采集了 226 份马铃薯 DUS 测试品种的 44 个性状数据, 并对其进行多样性、相关性和聚类等综合分析。结果表明, 所有性状平均多样性指数为 1.1721, 变幅为 0.0000~1.9668, 其中多样性指数 > 1.0000 的性状有 32 个。部分性状分布集中, 莲座状叶顶部绒毛只有 9 级代码, 而 90.1% 的马铃薯品种其植株顶部叶片无花青贰显色。相关性分析揭示, 花青贰显色相关的几组性状间存在极显著正相关, 花冠内侧花青贰显色强度与花冠内侧花青贰显色扩展范围存在极显著正相关, 相关系数为 0.97。聚类分析将 226 个品种分成 5 类, 植株顶部叶片花青贰显色和块茎表皮颜色可有效用于分组。

关键词 马铃薯; DUS 测试; 性状; 遗传多样性

马铃薯是世界第四大主粮作物, 在保障国家粮食安全、促进农业经济发展方面起着至关重要的作用^[1]。我国马铃薯种植面积约占世界种植面积的 1/4, 是马铃薯第一生产和消费大国, 2023 年我国马铃薯种植面积为 453.3 万 hm^2 , 总产量 9539 万 t ^[2]。优良品种是马铃薯产业的基础支撑, 为保护育种者权利, 推动马铃薯育种创新, 促进产业发展, 1999 年 4 月马铃薯被列入首批植物新品种保护名录^[3], 我国也于 1999 年加入国际植物新品种保护联盟 (International Union for the Protection of New Varieties of Plants, UPOV)。植物品种应具备特异性 (distinctness)、一致性 (uniformity) 和稳定性 (stability)^[4]。DUS 测试是品种管理中重要的技术手段, 也是品种保护、品种审定和品种登记的法定要求^[5]。

植物品种功能是否具备 DUS, 必须根据相应植物品种 DUS 测试指南或技术标准进行种植试验或实验室检测^[6]。2018 年《植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 马铃薯》(GB/T 19557.28-2018)^[7]发布, 此后我国马铃薯 DUS 测试均采用此国家标准, 性状是植物品种 DUS 测试审查的基础, 测试指南中性状的选择和评价对 DUS 测试审查的准确性和高效性至关重要。目前相关文献主

要从形态学指标^[8-9]、分子标记^[10-11]和生化标记^[12]等方面分析马铃薯品种遗传多样性, 利用 DUS 测试性状对培育品种进行描述和评价的研究较少。本研究依据马铃薯 DUS 测试指南中的测试性状, 对 226 份马铃薯品种进行综合分析, 旨在筛选出高效的 DUS 测试指标, 为测试机构开展马铃薯 DUS 测试提供科学有效的评价方法, 同时为育种工作者提供多样化的育种策略。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的 226 份马铃薯品种均由农业农村部植物新品种测试张家口分中心提供 (表 1, 编号末尾字母 A 代表测试品种, B 代表近似品种), 于 2022-2023 年集中种植在张家口市农业科学院坝上试验基地 (41°1' N, 114°7' E)。

1.2 测试项目与方法

试验采用随机区组设计, 共设 2 次重复, 每小区 51 株, 在马铃薯测试田块四周种植保护行, 马铃薯的田间管理与当地大田生产管理方式保持一致。44 个 DUS 测试性状 (表 2) 的观测时期和观测方法等按照《植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 马铃薯》(GB/T 19557.28-2018)^[7]标准

作者简介: 寇淑君, 主要从事植物新品种 DUS 测试和种质资源研究, E-mail: koushujun1986@163.com

左振兴为通信作者, 主要从事植物新品种 DUS 测试和作物栽培研究, E-mail: 542828071@qq.com

基金项目: 农业农村部品种资源保护费项目 (1120162130135396015)

收稿日期: 2025-02-13; 修回日期: 2025-05-06; 网络出版日期: 2025-07-18

表 1 参试马铃薯品种
Table 1 Potato varieties tested

序号 Number	测试编号 Test code	序号 Number	测试编号 Test code	序号 Number	测试编号 Test code	序号 Number	测试编号 Test code
1	20191000536A	58	20201006210A	115	20211001099A	172	20211002878A
2	20191000536B	59	20201006210B	116	20211001099B	173	20211002880A
3	20191000725B	60	20201006405A	117	20211001106A	174	20211003333A
4	20212002746A	61	20201006405B	118	20211001106B	175	20211003334A
5	20212002747A	62	20201006564A	119	20211001156A	176	20211003357A
6	20212002748A	63	20201006565A	120	20211001156B	177	20211003466A
7	20205003298A	64	20201006566A	121	20211002781A	178	20211003469A
8	20205250019A	65	20201006567A	122	20211002794A	179	20211004386A
9	20205250029A	66	20201006569A	123	20211002794B	180	2021101995A
10	20205250030A	67	20201006570A	124	20211002828A	181	2021102722A
11	20205250134A	68	20201006574A	125	20211002832A	182	2021102724A
12	20205250134B	69	20201006575A	126	20211002837A	183	2021104232A
13	20205250141A	70	20201006576A	127	20211002837B	184	2021104238A
14	20205250232A	71	20201007296A	128	20211002866A	185	2021104596A
15	20205250232B	72	20201007297A	129	20211002869A	186	2021104597A
16	20205250246A	73	20201007299A	130	20211002870A	187	2021104599A
17	20205250247A	74	20201007302A	131	20211002871A	188	2021104631A
18	20191000726A	75	20201007306A	132	20211002876A	189	2021104634A
19	20191000726B	76	20201007311A	133	20211002879A	190	20221000740A
20	20191001291A	77	20201007312A	134	2021102556A	191	20221000744A
21	20191001291B	78	20201007317A	135	2021104057A	192	20221000745A
22	20191002286A	79	20201007319A	136	20225250440A	193	20221000746A
23	20191005418A	80	20201007444A	137	20215250059A	194	20221000815A
24	20191005423A	81	20215250060A	138	20225250433A	195	20221000816A
25	20191005423B	82	20215250061A	139	20225250434A	196	20221001117A
26	20191005700A	83	20215250231A	140	20225250436A	197	20221001531A
27	20191005700B	84	20215250260A	141	20225250437A	198	20221001531B
28	20191005701A	85	20215250261A	142	20225250438A	199	20221001549A
29	20201000398A	86	20215250267A	143	20225250438B	200	20221001549B
30	20201000399A	87	20215250268A	144	20225250442A	201	20221001888A
31	20201000399B	88	20215250309A	145	20225250444A	202	20221001888B
32	20201000400A	89	20215250309B	146	20225250445A	203	20221001892A
33	20201000899A	90	20215250310A	147	20225250446A	204	20221001892B
34	20201001073A	91	20215250314A	148	20225250447A	205	20235250027A
35	20201001904A	92	20215250354A	149	20225250448A	206	20235250029A
36	20201002074A	93	20225250003A	150	20225250449A	207	20235250029B
37	20201002074B	94	20225250003B	151	20225250450A	208	20235250030A
38	20201002075A	95	20225250005A	152	20225250451A	209	20235250036A
39	20201002075B	96	20225250005B	153	20225250460A	210	20235250037A
40	20222002546A	97	20225250007A	154	20211000476A	211	20235250038A
41	20222002558A	98	20201003098A	155	20211000476B	212	20235250039A
42	20222002559A	99	20201007505A	156	20211001441A	213	20235250040A
43	20222002651A	100	20201007505B	157	20211001441B	214	20235250041A
44	20201002964A	101	20201007577A	158	20211002776A	215	20235250042A
45	20201002965A	102	20201007577B	159	20211002784A	216	20235250043A
46	20201002965B	103	20211000471A	160	20211002787A	217	20235250044A
47	20201003101A	104	20211000471B	161	20211002826A	218	20235250045A
48	20201003666A	105	20211000472A	162	20211002827A	219	20235250047A
49	20201004176A	106	20211000472B	163	20211002831A	220	20235250048A
50	20201004176B	107	20211000475A	164	20211002833A	221	20235250049A
51	20201005837A	108	20211000475B	165	20211002834A	222	20235250050A
52	20201005838A	109	20211000477A	166	20211002835A	223	20235250051A
53	20201005839A	110	20211000726A	167	20211002867A	224	20235250052A
54	20201005840A	111	20211000736A	168	20211002868A	225	20235250053A
55	20201005841A	112	20211000736B	169	20211002873A	226	20245250001A
56	20201006142A	113	20211000737A	170	20211002874A		
57	20201006142B	114	20211000737B	171	20211002875A		

表2 马铃薯 DUS 测试性状信息及观测方法
Table 2 Information and observation methods of potato DUS test traits

编号 Code	性状 Trait	性状类型 Expression trait	观测时期 Observation period	观测方法 Observation method	记载标准与分级 Record standard and classification
C1	光发芽: 大小	QN	幼芽期	VG	1: 极小; 2: 极小到小; 3: 小; 4: 小到中; 5: 中; 6: 中到大; 7: 大; 8: 大到极大; 9: 极大
C2	光发芽: 形状	PQ	幼芽期	VG	1: 球形; 2: 卵形; 3: 圆锥形; 4: 粗圆柱形; 5: 细圆柱形
C3	光发芽: 基部花青甙显色强度	QN	幼芽期	VG	1: 无或极弱; 2: 极弱到弱; 3: 弱; 4: 弱到中; 5: 中; 6: 中到强; 7: 强; 8: 强到极强; 9: 极强
C4	光发芽: 基部花青甙显色蓝色素比重	QN	幼芽期	VG	1: 无或低; 2: 中; 3: 高
C5	光发芽: 基部茸毛	QN	幼芽期	VG	1: 无或极少; 2: 极少到少; 3: 少; 4: 少到中; 5: 中; 6: 中到多; 7: 多; 8: 多到极多; 9: 极多
C6	光发芽: 顶部相对于基部大小	QN	幼芽期	VG	1: 极小; 2: 极小到小; 3: 小; 4: 小到中; 5: 中; 6: 中到大; 7: 大; 8: 大到极大; 9: 极大
C7	光发芽: 顶部习性	QN	幼芽期	VG	1: 并拢; 2: 并拢到半开展; 3: 半开展; 4: 半开展到开展; 5: 开展
C8	光发芽: 顶部花青甙显色强度	QN	幼芽期	VG	1: 无或极弱; 2: 极弱到弱; 3: 弱; 4: 弱到中; 5: 中; 6: 中到强; 7: 强; 8: 强到极强; 9: 极强
C9	光发芽: 顶部茸毛	QN	幼芽期	VG	1: 无或极少; 2: 极少到少; 3: 少; 4: 少到中; 5: 中; 6: 中到多; 7: 多; 8: 多到极多; 9: 极多
C10	光发芽: 根尖数量	QN	幼芽期	VG	1: 无或极少; 2: 极少到少; 3: 少; 4: 少到中; 5: 中; 6: 中到多; 7: 多; 8: 多到极多; 9: 极多
C11	光发芽: 侧枝长度	QN	幼芽期	VG	1: 极短; 2: 极短到短; 3: 短; 4: 短到中; 5: 中; 6: 中到长; 7: 长; 8: 长到极长; 9: 极长
C12	植株: 类型	QN	现蕾期	VG	1: 茎型; 2: 中间型; 3: 叶型
C13	植株: 生长习性	QN	现蕾期	VG	1: 直立; 2: 直立到半直立; 3: 半直立; 4: 半直立到开展; 5: 开展
C14	茎: 花青甙显色强度	QN	现蕾期	VG	1: 无或极弱; 2: 极弱到弱; 3: 弱; 4: 弱到中; 5: 中; 6: 中到强; 7: 强; 8: 强到极强; 9: 极强
C15	茎: 翼波状	PQ	现蕾期	VG	1: 直形; 2: 微波形; 3: 波形
C16	复叶: 大小	QN	现蕾期	VG/MS	1: 极小; 2: 极小到小; 3: 小; 4: 小到中; 5: 中; 6: 中到大; 7: 大; 8: 大到极大; 9: 极大
C17	复叶: 小叶排列状态	QN	现蕾期	VG	1: 叠合; 2: 叠合到相接; 3: 相接; 4: 相接到相离; 5: 相离
C18	复叶: 小裂叶数量	QN	现蕾期	VG/MS	1: 极少; 2: 极少到少; 3: 少; 4: 少到中; 5: 中; 6: 中到多; 7: 多; 8: 多到极多; 9: 极多
C19	复叶: 绿色程度	QN	现蕾期	VG	1: 极浅; 2: 极浅到浅; 3: 浅; 4: 浅到中; 5: 中; 6: 中到深; 7: 深; 8: 深到极深; 9: 极深
C20	复叶: 主脉上表面花青甙显色强度	QN	现蕾期	VG	1: 无或极弱; 2: 极弱到弱; 3: 弱; 4: 弱到中; 5: 中; 6: 中到强; 7: 强; 8: 强到极强; 9: 极强
C21	小叶: 顶小叶大小	QN	现蕾期	VG	1: 极小; 2: 极小到小; 3: 小; 4: 小到中; 5: 中; 6: 中到大; 7: 大; 8: 大到极大; 9: 极大
C22	小叶: 联会频率	QN	现蕾期	VG	1: 极低; 2: 极低到低; 3: 低; 4: 低到中; 5: 中; 6: 中到高; 7: 高; 8: 高到极高; 9: 极高
C23	小叶: 边缘波状程度	QN	现蕾期	VG	1: 无或极弱; 2: 极弱到弱; 3: 弱; 4: 弱到中; 5: 中; 6: 中到强; 7: 强; 8: 强到极强; 9: 极强
C24	小叶: 光泽度	QN	现蕾期	VG	1: 弱; 2: 中; 3: 强
C25	叶: 莲座状叶顶部绒毛	QL	现蕾期	VG	1: 无; 9: 有
C26	花蕾: 花青甙显色强度	QN	现蕾期	VG	1: 无或极弱; 2: 极弱到弱; 3: 弱; 4: 弱到中; 5: 中; 6: 中到强; 7: 强; 8: 强到极强; 9: 极强
C27	植株: 高度	QN	开花期	VG/MG	1: 极矮; 2: 极矮到矮; 3: 矮; 4: 矮到中; 5: 中; 6: 中到高; 7: 高; 8: 高到极高; 9: 极高
C28	植株: 开花频率	QN	开花期	VG	1: 无或极低; 2: 极低到低; 3: 低; 4: 低到中; 5: 中; 6: 中到高; 7: 高; 8: 高到极高; 9: 极高
C29	植株: 顶部叶片花青甙显色	QL	开花期	VG	1: 无; 9: 有
C30	花序: 大小	QN	开花期	VG	1: 极小; 2: 极小到小; 3: 小; 4: 小到中; 5: 中; 6: 中到大; 7: 大; 8: 大到极大; 9: 极大
C31	花序: 总梗花青甙显色强度	QN	开花期	VG	1: 无或极弱; 2: 极弱到弱; 3: 弱; 4: 弱到中; 5: 中; 6: 中到强; 7: 强; 8: 强到极强; 9: 极强

续表 2 Table 2 (continued)

编号 Code	性状 Trait	性状类型 Expression trait	观测时期 Observation period	观测方法 Observation method	记载标准与分级 Record standard and classification
C32	花冠：大小	QN	开花期	VG	1：极小；2：极小到小；3：小；4：小到中；5：中；6：中到大；7：大；8：大到极大；9：极大
C33	花冠：形状	PQ	开花期	VG	1：星形；2：近五边形；3：近圆形
C34	花冠：内侧花青甙显色强度	QN	开花期	VG	1：无或极弱；2：极弱到弱；3：弱；4：弱到中；5：中；6：中到强；7：强；8：强到极强；9：极强
C35	花冠：内侧花青甙显色蓝色素比重	QN	开花期	VG	1：无或低；2：中；3：高
C36	花冠：内侧花青甙显色扩展范围	QN	开花期	VG	1：无或极小；2：极小到小；3：小；4：小到中；5：中；6：中到大；7：大；8：大到极大；9：极大
C37	成熟期	QN	成熟期	MG	1：极早；2：极早到早；3：早；4：早到中；5：中；6：中到晚；7：晚；8：晚到极晚；9：极晚
C38	块茎：形状	PQ	收获期	VG	1：圆形；2：短卵圆形；3：卵圆形；4：长卵圆形；5：长形；6：极长形
C39	块茎：芽眼深度	QN	收获期	VG	1：极浅；2：极浅到浅；3：浅；4：浅到中；5：中；6：中到深；7：深；8：深到极深；9：极深
C40	块茎：表皮光滑度	QN	收获期	VG	1：光滑；2：光滑到中等；3：中等；4：中等到粗糙；5：粗糙
C41	块茎：表皮颜色	PQ	收获期	VG	1：浅黄色；2：黄色；3：浅红色；4：红色；5：部分红色；6：蓝色；7：部分蓝色；8：红褐色
C42	块茎：芽眼基部颜色	PQ	收获期	VG	1：白色；2：黄色；3：红色；4：蓝色
C43	块茎：薯肉颜色	PQ	收获期	VG	1：白色；2：乳白色；3：浅黄色；4：中等黄色；5：深黄色；6：红色；7：部分红色；8：蓝色；9：部分蓝色
C44	块茎：光照后表皮花青甙显色强度	QN	收获期	VG	1：无或极弱；2：极弱到弱；3：弱；4：弱到中；5：中；6：中到强；7：强；8：强到极强；9：极强

进行，个体观测性状植株取样数量不少于 20 株，群体测量和群体目测性状需观测整个小区。性状类型包括质量性状 (quality trait, QL)、假质量性状 (false qualitative trait, PQ) 和数量性状 (quantitative trait, QN)；观测方法分为群体测量 (group measurement, MG)、个体测量 (single measurement, MS) 和群体目测 (group visual observation, VG)。观测时期分为幼芽期 (在规定光强和光谱范围的弱光条件下，幼芽生长 8~10 周)、现蕾期 (花蕾超出顶叶的植株占小区总株数的 75% 以上)、开花期 (第一花序有 1~2 朵花开的植株占小区总株数的 75% 以上) 和收获期。

1.3 数据处理

利用 SPSS Statistics 26.0 进行描述性统计分析，利用 GraphPad Prism 8 绘制频次分布图，利用 Origin 2021 绘制相关性热图和聚类分析图，利用 Popgene 32 软件分析不同性状的 Shannon's 多样性指数 (H') [13]： $H' = -\sum P_i \ln(P_i)$ ，式中， P_i 为某个性状第 i 个代码出现的概率。

2 结果与分析

2.1 基于 DUS 测试性状的遗传多样性分析

如表 3 所示，利用马铃薯 DUS 测试指南中的

44 个测试性状 (C1~C44) 对 226 份品种进行多样性分析，平均 Shannon's 多样性指数为 1.1721，变幅为 0.0000~1.9668。其中，光发芽顶部花青甙显色强度 (C8) 和光发芽基部花青甙显色强度 (C3) 多样性指数最高，分别为 1.9668 和 1.9277。其次是块茎薯肉颜色 (C43)、花蕾花青甙显色强度 (C26) 和成熟期 (C37)，多样性指数分别为 1.8137、1.7614 和 1.7582。这 5 个性状在 DUS 测试特异性判定中可以充分加以利用。多样性指数 >1.0000 的性状有 32 个，表明 226 个马铃薯品种的遗传多样性比较丰富。多样性指数 <0.5000 的性状有 4 个，其中莲座状叶顶部绒毛 (C25) 只有 1 个表达状态，多样性指数为 0.0000。在马铃薯品种 DUS 进行特异性判定时，应着重关注多样性指数较大的性状。

2.2 马铃薯 DUS 测试性状分析

测试指南中按照测试性状的表达方式将性状分为质量性状、数量性状和假质量性状，假质量性状是指表达范围至少部分连续，但在 1 个以上方向 (维度) 上存在变异的性状 [14]。如图 1 所示，质量性状中，莲座状叶顶部绒毛 (C25) 只有 9 级代码，此性状在各品种间无区别，植株顶部叶片花青甙显色 (C29) 以无色为主，占比 90.1%；所有假

表 3 观测性状的多样性指数
Table 3 Diversity index of observation traits

编号 Code	性状 Trait	多样性指数 Diversity index	编号 Code	性状 Trait	多样性指数 Diversity index
C1	光发芽：大小	1.3023	C23	小叶：边缘波状程度	1.3294
C2	光发芽：形状	1.1532	C24	小叶：光泽度	0.2268
C3	光发芽：基部花青甙显色强度	1.9277	C25	叶：莲座状叶顶部绒毛	0.0000
C4	光发芽：基部花青甙显色蓝色素比重	0.7823	C26	花蕾：花青甙显色强度	1.7614
C5	光发芽：基部茸毛	1.6709	C27	植株：高度	1.2840
C6	光发芽：顶部相对于基部大小	1.3349	C28	植株：开花频率	1.5363
C7	光发芽：顶部习性	1.2485	C29	植株：顶部叶片花青甙显色	0.3232
C8	光发芽：顶部花青甙显色强度	1.9668	C30	花序：大小	1.0869
C9	光发芽：顶部茸毛	1.5239	C31	花序：总梗花青甙显色强度	1.4880
C10	光发芽：根尖数量	1.3581	C32	花冠：大小	0.9578
C11	光发芽：侧枝长度	1.2352	C33	花冠：形状	0.2053
C12	植株：类型	0.5396	C34	花冠：内侧花青甙显色强度	1.3408
C13	植株：生长习性	0.6882	C35	花冠：内侧花青甙显色蓝色素比重	0.6354
C14	茎：花青甙显色强度	1.5836	C36	花冠：内侧花青甙显色扩展范围	1.1678
C15	茎：翼波状	0.8594	C37	成熟期	1.7582
C16	复叶：大小	1.2358	C38	块茎：形状	1.3910
C17	复叶：小叶排列状态	0.9809	C39	块茎：芽眼深度	1.2467
C18	复叶：小裂叶数量	1.3085	C40	块茎：表皮光滑度	1.0639
C19	复叶：绿色程度	1.1243	C41	块茎：表皮颜色	1.0454
C20	复叶：主脉上表面花青甙显色强度	1.4522	C42	块茎：芽眼基部颜色	0.8408
C21	小叶：顶小叶大小	1.0781	C43	块茎：薯肉颜色	1.8137
C22	小叶：联会频率	1.5848	C44	块茎：光照后表皮花青甙显色强度	1.1301

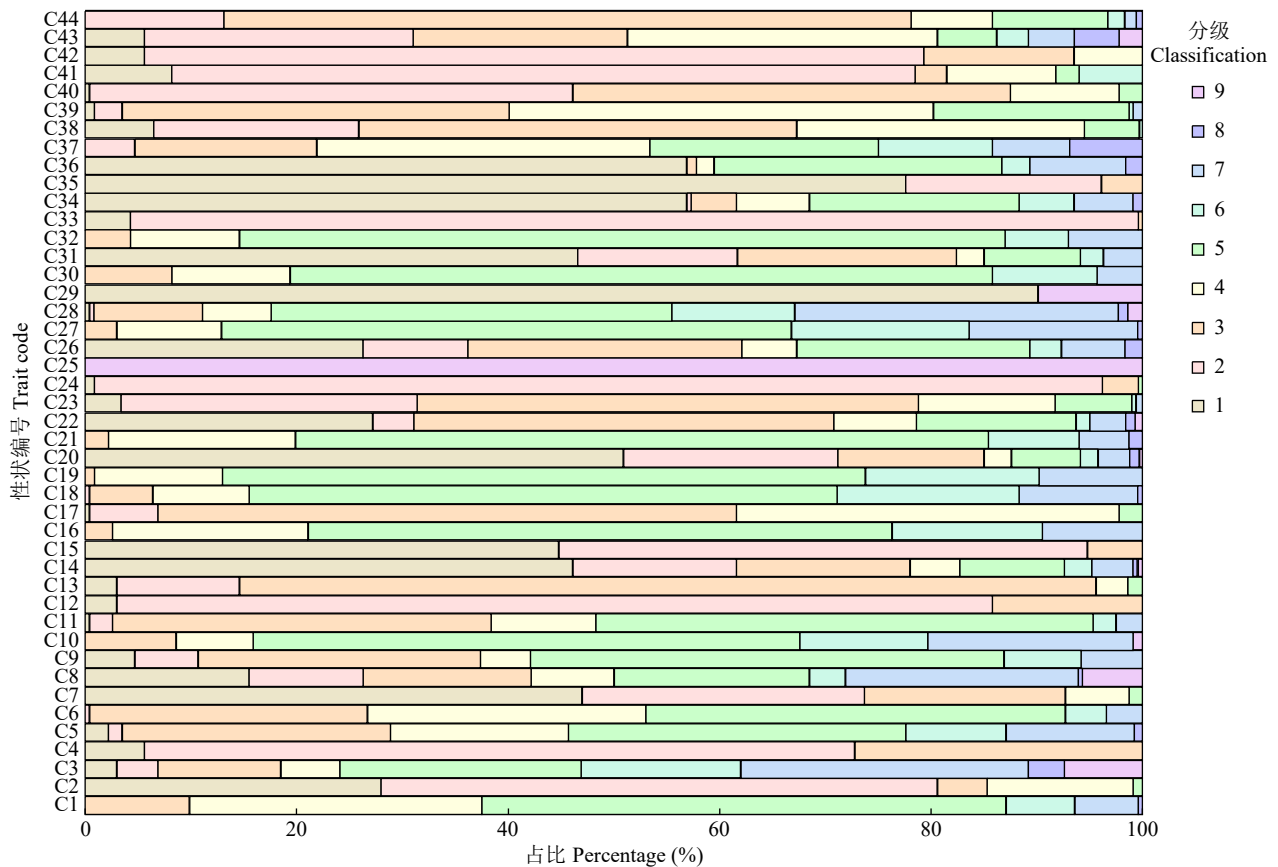


图 1 DUS 测试性状代码频次分布图
Fig.1 Frequency distribution of codes for DUS test traits

质量性状中，光发芽形状（C2）以卵形为主，占比 52.6%；茎翼波状（C15）以微波形为主，占比 50.0%；花冠形状（C33）以近五边形为主，占比 95.3%；块茎形状（C38）以卵圆形为主，占比 41.3%；块茎表皮颜色（C41）以黄色为主，占比 70.3%；块茎芽眼基部颜色（C42）以黄色为主，占比 73.7%。块茎薯肉颜色（C43）在 9 个分级中均有分布，其中乳白色（25.4%）、浅黄色（20.3%）及中等黄色（29.3%）分布较多。质量性状和假质量性状在马铃薯申请品种特异性的判定上具有局限性。

在马铃薯 DUS 测试指南中，数量性状占比较大（77.27%），相较于质量性状和假质量性状，数量性状在不同品种间表达比较充分，代码的离散程度较大，其中 9 个性状在指南对应代码上均有表达，数量性状更能用于区分不同的马铃薯品种，在马铃薯品种特异性的判定上要大于质量性状和假质量性状。

2.3 马铃薯 DUS 测试性状相关性分析

利用皮尔逊（Pearson）的积聚相关系数对 28 个与马铃薯品种不同组织或部位的颜色、大小相关的性状进行相关性分析，结果如图 2 所示。光发芽基部花青甙显色强度（C3）与光发芽顶部花青甙显色强度（C8）、茎花青甙显色强度（C14）、复叶主脉上表面花青甙显色强度（C20）、花蕾花青甙显色强度（C26）存在极显著正相关，相关系数分别为 0.81、0.69、0.65 和 0.62；茎花青甙显色强度（C14）与复叶主脉上表面花青甙显色强度（C20）、花序总梗花青甙显色强度（C31）、块茎表皮颜色（C41）存在极显著正相关，相关系数分别为 0.87、0.70 和 0.68；花冠内侧花青甙显色强度（C34）与花冠内侧花青甙显色扩展范围（C36）存在极显著正相关，相关系数为 0.97；块茎表皮颜色（C41）与块茎芽眼基部颜色（C42）存在极显著正相关，相关系数为 0.89，涉及马铃薯光发芽、茎、复叶主

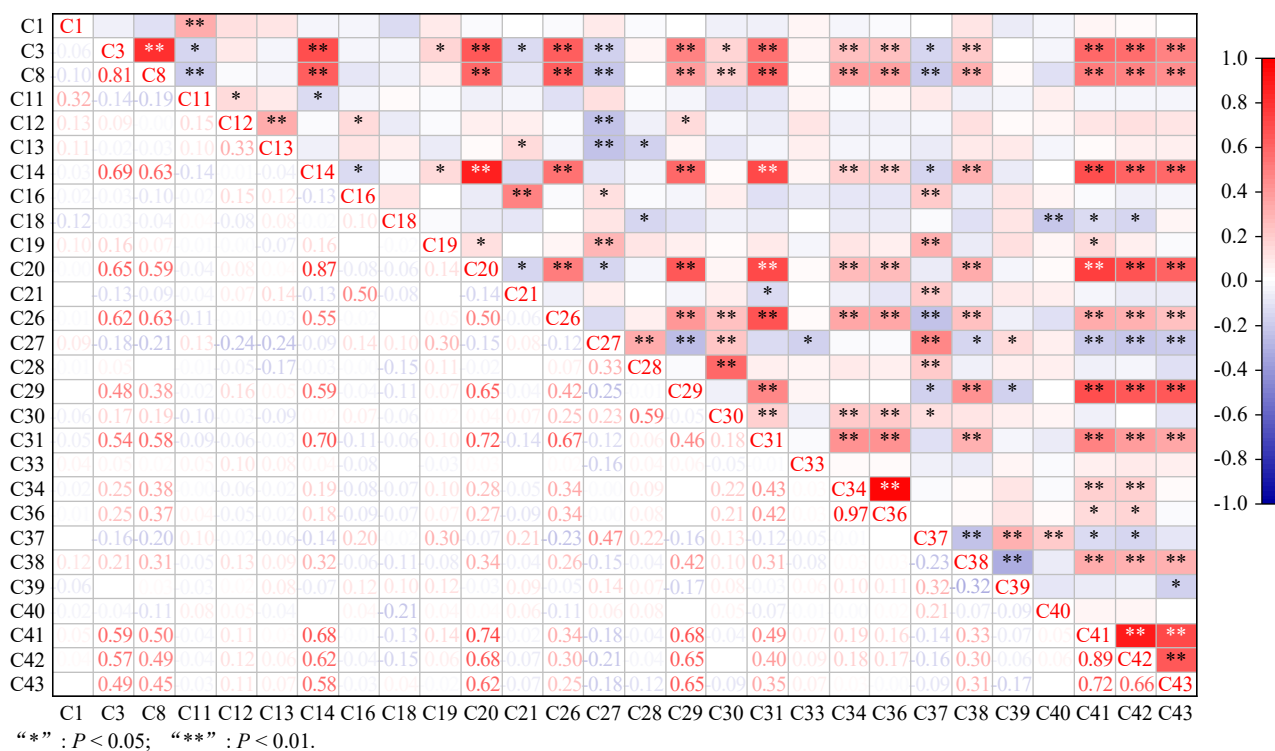


图 2 28 个马铃薯 DUS 测试性状的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis among 28 potato DUS test traits

脉、花序总梗的花青甙显色及块茎表皮颜色和芽眼基部颜色等性状之间相关性较高。

2.4 基于 DUS 测试性状的马铃薯品种聚类分析

利用非加权平均法对 226 个马铃薯测试品种进行系统聚类，结果如图 3 所示。以遗传距离 0.45

为阈值，聚类结果分为 5 大类。类群 I 包含 11 个品种（占比 4.87%），主要特征为光发芽基部花青甙显色中等，光发芽顶部花青甙显色弱到中，植株顶部叶片无花青甙显色，块茎表皮颜色以浅红色和红色为主；类群 II 包含 9 个品种（占比 3.98%），主

要特征为光发芽基部花青甙显色强到极强,植株生长习性半直立,植株顶部叶片无花青甙显色,成熟期早到中,块茎表皮以红色和蓝色为主,块茎薯肉颜色以部分红色和部分蓝色为主;类群 III 包含 23 个品种(占比 10.20%),主要特征为光发芽基部花青甙显色强到极强,光发芽顶部习性并拢,植株顶部有叶片花青甙显色,块茎表皮颜色以蓝色为主,块茎薯肉颜色以蓝色为主;类群 IV 包含 62 个

品种(占比 27.40%),主要特征为光发芽顶部花青甙显色以无色或浅色为主,茎花青甙显色强度以无色为主,复叶主脉上表面花青甙显色强度以无色为主,花蕾花青甙显色强度以无色为主,植株顶部叶片无花青甙显色,花冠内侧花青甙显色强度以无色为主,块茎表皮颜色以黄色为主;类群 V 包含 121 个品种(占比 53.50%),主要特征为植株顶部叶片无花青甙显色,块茎表皮颜色以黄色为主。

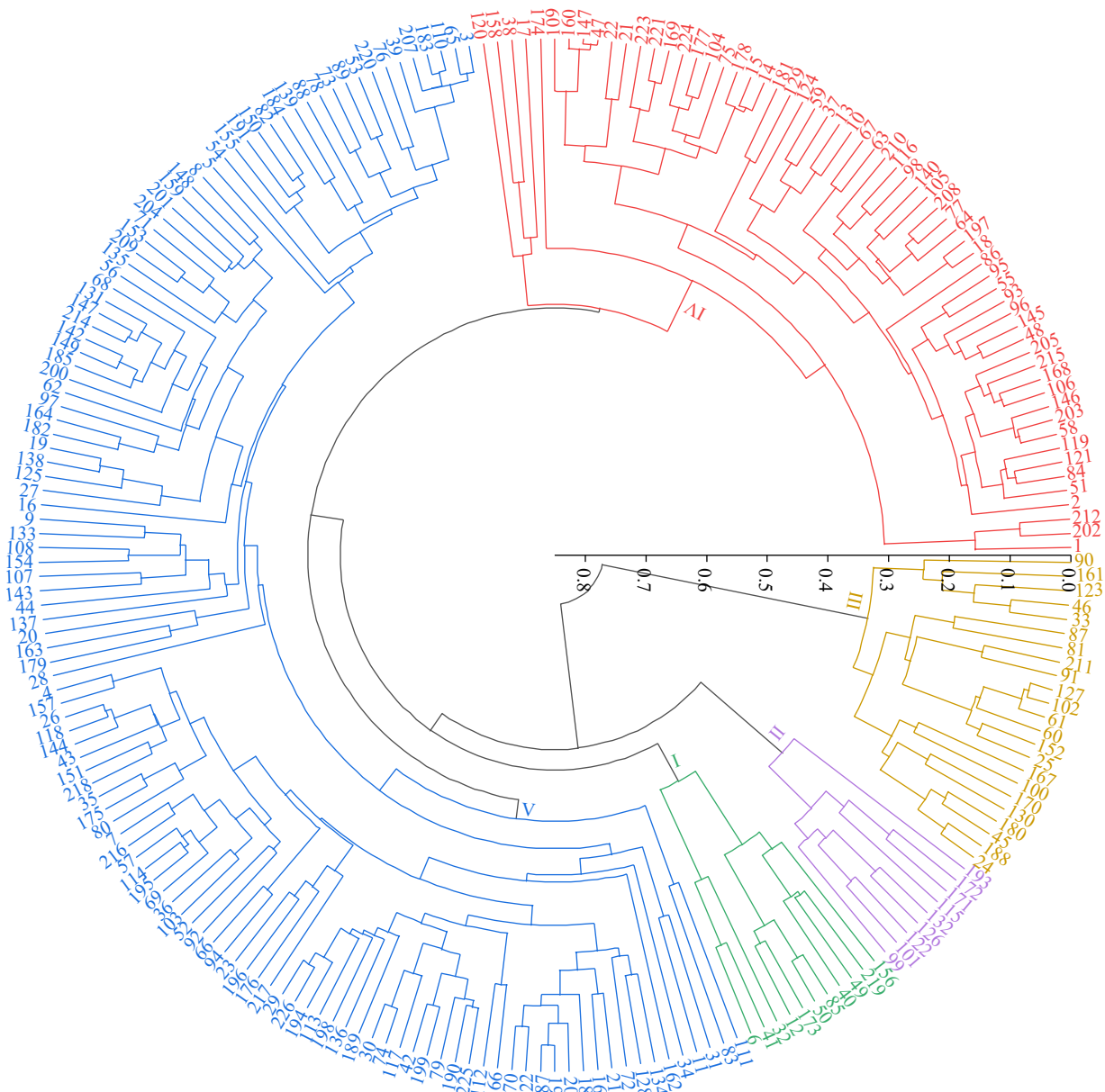


图 3 基于表型性状的 226 个马铃薯品种聚类分析

Fig.3 Clustering analysis of 226 potato varieties based on phenotypic traits

3 讨论

本研究中,测试品种涉及华北、西南和西北

等多个生态区域,相较于冀北地区马铃薯品种,所测试的马铃薯品种具有丰富的遗传基础^[15]。44 个测试性状的遗传多样性指数为 0.0000~1.9668,

其中块茎薯肉颜色 (C43) 是假质量性状, 多样性指数为 1.7582, 可以作为特异性判定的关键性状。徐晓等^[8]研究表明, 株型、芽眼深浅、块茎整齐度、薯肉颜色、薯皮色和薯形的遗传多样性程度较高; 张晓煜等^[11]研究表明, 薯肉颜色的多样性指数最高; 张川等^[9]研究表明, 薯肉颜色、开花频率和块茎形状的遗传多样性指数较高。本研究结果同样认为薯肉颜色是影响表型多样性的主要因素, 与上述研究结果一致。

《植物新品种特异性、一致性和稳定性审查及性状统一描述总则》^[14]要求 DUS 测试性状在品种间能表现出足够的差异, 本研究中性状莲座状叶顶部绒毛 (C25) 只有 1 个表达状态, 花冠形状 (C33)、小叶光泽度 (C24)、植株顶部叶片花青甙显色 (C29) 等性状代码分布集中, 在品种间区别度较小, 在判定品种特异性方面有局限性。马铃薯优质新品种选育需要扩大亲本材料的遗传背景, 建议育种者培育高产优质马铃薯品种时, 多关注区分度较小的性状, 丰富遗传基础, 创新育种材料, 获得更加优质的马铃薯新品种。

相关性分析结果表明, 与花青甙显色强度相关的几组性状 (马铃薯光发芽、茎、复叶主脉、花序总梗的花青甙显色) 间相关系数较高, 这与程静等^[15]的研究结果一致, 在马铃薯 DUS 测试和审查时, 要针对花青甙显色相关性状进行重点比较, 在之后马铃薯测试指南修订时可以考虑对花青甙显色相关性状进行组合和优化。

在 DUS 测试指南分组性状的选择上, 应当充分借鉴形态性状多样性分析, 尤其是聚类分析的结果, 尽量把品种区分能力强、区分效果好的性状列为分组性状。226 个马铃薯品种被分为 5 个类群, 光发芽基部花青甙显色 (C3)、植株顶部叶片花青甙显色 (C29) 和块茎表皮颜色 (C41) 可以有效区分不同类群, 可作为分组性状。测试品种序号 11 与 12, 18 与 19, 20 与 21, 93 与 94 是育种人提供的几组对应的申请品种和近似品种, 从聚类结果来看, 近似品种与对应的申请品种分布在不同的类群中, 申请人提供的近似品种可能不准确, 在第一生长周期结束后, 可以利用品种描述数据进行聚类分析, 并根据聚类分析结果, 筛选近似品种。DUS 测试是品种权授权的技术依据, 其中特异性的测试尤为重要。表型性状易受

环境因素的影响, 尤其是不同测试分中心的表型数据存在环境误差, DNA 分子标记技术在 DUS 测试中的应用越来越广泛, 目前, 玉米、小麦、水稻、大豆及油菜等作物已借助 DNA 分子标记技术用于近似品种筛选和真实性鉴定, 大大提高了筛选的效率和准确性^[16], 马铃薯是同源四倍体作物, 基因组高度杂合^[11], DUS 测试机构需建立马铃薯分子鉴定标准, 以精确筛选近似品种, 鉴定品种特异性。同一个地区尤其是同一育种单位的育成品种, 形态差异小, 亲缘关系近, 通常聚在同个分支, 这与段艳凤^[17]的研究结果一致。建议育种人在选育马铃薯新品种时, 除了关注品种、产量和抗性外, 也要以马铃薯 DUS 测试性状为基础, 通过聚类分组, 选择各组中的优良材料, 加强各类群间的组合配置, 丰富马铃薯育种资源, 推进育种创新。

4 结论

现有马铃薯测试指南中性状光发芽基部花青甙显色强度 (C3)、光发芽顶部花青甙显色强度 (C8)、块茎薯肉颜色 (C43)、花蕾花青甙显色强度 (C26) 和成熟期 (C37) 多样性指数较高, 可以有效区分品种, 但是花青甙显色相关性状间存在极显著相关性, 建议之后马铃薯 DUS 测试指南修订时可以考虑对花青甙显色相关性状进行优化。结合分子技术和 DUS 测试性状的聚类结果进行近似品种的筛选可以更加准确、高效地判定品种特异性。

参考文献

- [1] 王素华, 李树举, 杨丹, 等. 中国马铃薯产业的发展现状及方向. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2019.
- [2] 金黎平, 吕文河. 马铃薯产业与大食物观点. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2024.
- [3] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国植物新品种保护条例. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [4] 刘振伟, 余欣荣, 张建龙. 中华人民共和国种子法导读. 北京: 中国法制出版社, 2016.
- [5] 罗元凯, 王晨宇, 张秀杰, 等. 基于 DUS 的 30 份普通小麦品种多样性及相关性分析. 江苏农业科学, 2024, 52(21): 97-103.
- [6] 杨旭红. 农业植物品种 DUS 测试指南和标准管理信息化探讨. 作物杂志, 2023(2): 10-15.
- [7] 全国植物新品种测试标准化技术委员会. 植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 马铃薯: GB/T 19557.28-2018. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018.
- [8] 徐晓, 杨梦颖, 满全财, 等. 195 份马铃薯种质资源表型性状综合评价. 核农学报, 2023, 37(9): 1710-1722.

- [9] 张川, 梁金平, 罗文彬, 等. 50份马铃薯种质资源表型鉴定和遗传多样性分析. 江苏农业科学, 2024, 52(8): 31-37.
- [10] 宋峥, 王崇, 徐颖华, 等. 马铃薯地方种质资源的SSR遗传多样性分析. 分子植物育种, 2022, 20(21): 7143-7153.
- [11] 张晓煜, 王仕鹏, 曹昆山, 等. 基于表型性状与SSR标记的马铃薯种质资源遗传多样性研究. 西北农业学报, 2024, 33(8): 1436-1447.
- [12] 洪森荣, 张铭心, 叶思雨, 等. 高山马铃薯种质资源遗传多样性的同工酶分析. 浙江农业学报, 2018, 30(9): 1445-1453.
- [13] Yeh F C, Boyle T J. Population genetic analysis of co-dominant and dominant markers and quantitative characteristics. *Belgian Journal of Botany*, 1997, 129: 157.
- [14] 唐浩. 植物新品种特异性、一致性和稳定性审查及性状统一描述总论. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [15] 程静, 田佳, 马恢, 等. 基于DUS测试性状的冀北地区马铃薯品种遗传多样性分析. 种子, 2024, 43(2): 127-134.
- [16] 韩瑞玺, 张晗, 赵艳杰, 等. DNA分子标记技术在DUS测试中的应用探讨. 中国种业, 2019(2): 43-45.
- [17] 段艳凤. 马铃薯种质资源遗传多样性评价及抗晚疫病相关基因分析. 北京: 中国农业科学院, 2019.

Genetic Diversity and Trait Correlation Analysis of Potato Varieties Based on DUS Testing Traits

Kou Shujun, Wang Yao, Fu Guoqing, Ji Junjian, Huo Ahong, Chen Lingwei, Zuo Zhenxing

(Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract To optimize the evaluation of potato DUS (distinctness, uniformity, and stability) testing and provide guidance for phenotypic selection in new potato variety breeding, data on 44 traits from 226 potato DUS test varieties were collected, and comprehensive analyses including diversity, correlation, and clustering were conducted. The results showed that average diversity index was 1.1721, ranging from 0.0000 to 1.9668, with 32 traits having a diversity index greater than 1.0000, indicating relatively high variability. However, some traits exhibited highly concentrated distributions. Pubescence on the top of rosette leaves had only nine grade code, and 90.1% of the varieties exhibited no anthocyanin coloration in the top leaves of plants. Correlation analysis revealed that several groups of traits related to anthocyanin coloration had highly significant positive correlations. Intensity of anthocyanin coloration on the inner side of the corolla was extremely significantly positively correlated with extent of anthocyanin coloration distribution on the inner corolla, with a correlation coefficient of 0.97. Cluster analysis divided the 226 varieties into five groups. Anthocyanin coloration of the top leaves and tuber skin color can be effectively used for grouping.

Key words Potato; DUS testing; Traits; Genetic diversity