

# 117份高抗晚疫病马铃薯种质资源遗传多样性分析

孙邦升, 宋继玲, 杨梦平, 邢金月, 胡尊艳, 郝智勇, 李菁华

(黑龙江省农业科学院克山分院 黑龙江齐齐哈尔 161005)

**摘要:**以 117 份高抗晚疫病马铃薯种质资源为试验材料,通过遗传多样性指数、变异系数及聚类分析等方法,对 117 份试验材料的 26 个性状进行分析。结果表明,20 个质量性状的遗传多样性指数变化范围为 0.35~1.61,6 个数量性状变异系数大小排序依次为:主茎数>块茎产量>株高>干物质含量>茎粗>淀粉含量,遗传多样性指数变化范围为 0.99~1.50。通过聚类分析,117 份试验材料被划分为 4 类,第 I 类材料多样性丰富,整体性状表现优良,比较符合现有栽培品种的性状特点;第 II 类材料平均产量较高,聚合了我国主栽的 4 个高抗晚疫病马铃薯品种,可作为晚疫病抗性育种亲本;第 III 类材料主茎数较多,植株整体表现为短日照类型,可作为抗性育种的抗原材料;第 IV 类材料包含 4 份资源,产量最高,可直接用于生产和育种亲本。对 117 份材料进行 R8 分子标记检测,其中 104 份资源含有 R8 基因,可作为晚疫病抗性基因聚合育种的基础材料。

**关键词:**马铃薯;晚疫病;遗传多样性;抗性基因

中图分类号:S532

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2024)09-037-10

## Genetic diversity analysis of 117 potato germplasm resources with high resistance to late blight

SUN Bangsheng, SONG Jiling, YANG Mengping, XING Jinyue, HU Zunyan, HAO Zhiyong, LI Jinghua  
(Keshan Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161005, Heilongjiang, China)

**Abstract:** This study used 117 potato germplasm resources with high resistance to late blight preserved in the National Potato Germplasm Resource Bank as experimental materials. Through methods such as genetic diversity index, coefficient of variation, and cluster analysis, 26 traits of 117 experimental materials were analyzed. The results showed that the genetic diversity index of 20 qualitative traits ranged from 0.35 to 1.61. The order of variation coefficients for the 6 quantitative traits was: Number of main stems>tuber yield>plant height>dry matter content>stem diameter>starch content. The genetic diversity index ranged from 0.99 to 1.50. Through cluster analysis, 117 experimental materials were divided into 4 categories. The first category of materials has rich diversity and overall excellent performance, which is more in line with the characteristics of existing cultivated varieties. The average yield of Class II materials is relatively high, which aggregates four high resistance potato varieties mainly planted in China and can be used as direct parents for late blight resistance breeding. The third type of material has a larger number of main stems and the overall plant exhibits a short day type, which can be used as antigen materials for resistance breeding. The fourth type of resource contains four resources, with the highest yield performance and can be directly used for production and breeding of parents. Through R8 molecular marker detection on 117 materials, 104 resources contain R8 gene, which can be used as the basic material for late blight resistance gene aggregation breeding.

**Key words:** Potato; Late blight; Genetic diversity; Resistance gene

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是茄科茄属的一年生草本块茎植物,别名在我国有 20 多种,如土豆、洋芋、山药蛋等,染色体基数  $n=12$ ,包括二倍体( $2n=24$ )、三倍体( $3n=36$ )、四倍体( $4n=48$ )、五倍体

( $5n=60$ )、六倍体( $6n=72$ )等系列倍性的种<sup>[1]</sup>。马铃薯现已成为世界第三大粮食作物,全球有 160 多个国家和地区种植马铃薯,根据国家统计局 2022 年的统计,我国 2022 年马铃薯产量 1 798.4 万 t,总种

收稿日期:2024-03-18;修回日期:2024-06-29

基金项目:国家马铃薯种质资源安全保存项目(19230823);黑龙江省农业创新跨越工程(CX23TS24);黑龙江省农业科学院院级课题(2020YYF003)

作者简介:孙邦升,男,助理研究员,主要从事马铃薯种质资源研究。E-mail:sunbangsheng0451@163.com

通信作者:宋继玲,女,副研究员,主要从事马铃薯种质资源研究。E-mail:jl\_song929@126.com

植面积 475.81 万  $\text{hm}^2$ , 是当今世界上马铃薯第一大生产国<sup>[2]</sup>。但我国马铃薯单产与世界平均水平相比还比较低, 造成这一现象的原因有很多, 其中马铃薯晚疫病的危害是主要的原因之一。根据国家统计局、全国植保专业统计资料、中国农业统计资料, 在 2008—2017 年间, 马铃薯晚疫病的年平均发生面积超过 190 万  $\text{hm}^2$ , 超出总种植面积的 40.66%<sup>[3-5]</sup>, 中国马铃薯晚疫病每年发病面积大约 17.3 万  $\text{hm}^2$ , 减产 10%~15%, 造成的经济损失约 20 亿元<sup>[6-8]</sup>。防治马铃薯晚疫病的主要方法包括选育抗病品种、化学药剂防治、建立无病留种田、进行合理的田间管理与轮作 4 种方式, 其中选育抗病品种是最经济有效的防治方法。现阶段我国育成和引进了大量的抗马铃薯晚疫病的种质资源, 但随着马铃薯晚疫病生理小种的不断变化, 在生产上逐渐失去田间抗性。马铃薯非我国原产作物, 晚疫病抗性育种材料主要靠国外引进和改良创新, 抗马铃薯晚疫病种质资源来源多元化, 亲缘关系复杂, 我国马铃薯种质资源库中现保存的马铃薯种质资源有 2600 余份, 晚疫病抗性达到抗病级别以上的马铃薯种质资源 345 份, 来自 21 个国家和地区, 遗传背景复杂, 对更好地利用现有资源进行抗马铃薯晚疫病育种、分析晚疫病抗性材料的亲缘关系和寻找具有水平抗性基因的种质资源具有重要意义。随着对晚疫病研究的不断深入, 发现在现有晚疫病菌生理小种环境下, 含有 *R* 基因的群体发病较轻, 源自于墨西哥的六倍体野生种 *Solanum demissum* 中的晚疫病抗病基因 *RI~RII*, 已相继被导入到马铃薯栽培种中, 在马铃薯抗晚疫病育种中得到广泛利用, 随着生物技术的不断应用, *RI*、*R2*、*R3a*、*R3b*、*R8* 相继被克隆, 并开发了相应的分子标记, 应用于分子辅助育种, 其中 *R8* 基因具有较强的田间抗性, 能够显著延迟晚疫病发病时间, 并且具有广谱和持久抗性, 含有 *R8* 基因的品种在欧洲、北美地区抗性表现良好<sup>[9-10]</sup>。

笔者以高抗马铃薯晚疫病的 117 份种质资源为试验材料, 通过分析我国现有高抗晚疫病种质资源的遗传多样性和 *R8* 基因型鉴定 2 种方式, 分析其亲缘关系远近, 筛选出具有广谱和持久抗性的高抗马铃薯晚疫病的种质资源, 为马铃薯晚疫病遗传育种和分子辅助聚合抗性育种提供遗传材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以筛选的 117 份高抗马铃薯晚疫病种质资源

为试验材料, 主要包括育成品种、品系及遗传材料(表 1)。

### 1.2 DNA 提取

取试管苗新鲜叶片, 使用天根 DP-320 试剂盒进行 DNA 提取。

### 1.3 *R8* 基因型检测

PCR 扩增体系 10  $\mu\text{L}$ : 正向、反向引物(正向序列: CTGGCGCTGGTTTTGCTATGC; 反向序列: TCTCTTCGACTTCTTCTTACGAGGTCTA)各 0.5  $\mu\text{L}$ ,  $2\times\text{Taq}$  PCR Master Mix 5  $\mu\text{L}$ , ddH<sub>2</sub>O 3  $\mu\text{L}$ , 模板 DNA 1.0  $\mu\text{L}$ ; PCR 扩增程序: 95  $^{\circ}\text{C}$  预变性 3 min, 95  $^{\circ}\text{C}$  变性 30 s, 60  $^{\circ}\text{C}$  退火 30 s, 72  $^{\circ}\text{C}$  延伸 1 min, 35 个循环, 72  $^{\circ}\text{C}$  延伸 5 min, 4  $^{\circ}\text{C}$  保存。PCR 扩增后, 琼脂糖电泳检测: 上样量为 5  $\mu\text{L}$ , 琼脂糖凝胶浓度为 1.2%, 电压 120 V, 电泳 25 min。紫外灯下观察结果并拍照<sup>[11]</sup>。

### 1.4 数据采集

117 份试验材料在黑龙江省农业科学院克山分院试验地种植, 试验数据采用 2007—2022 年的多年调查的平均数据, 共采集 117 份高抗晚疫病马铃薯种质资源的 26 个性状, 其中包括 20 个质量性状和 6 个数量性状, 晚疫病鉴定采用田间自然发病法, 植物学鉴定和抗性鉴定方法参照《马铃薯种质资源描述规范和数据标准》<sup>[1]</sup> 执行。利用 Spss16.0 软件采用组间链接法、欧氏距离进行系统聚类分析, 利用 Excel 软件整理数据, 统计分析各个性状的最大值、最小值、标准偏差、平均值, 计算变异系数、Shannon-wiener 多样性指数, 分析其遗传多样性, 质量性状对每一个性状进行赋值(表 2), 数量性状进行质量化处理, 即数量性状依均值( $\bar{X}$ )和标准差( $\sigma$ )分为 10 级, 1 级  $X_i < \bar{X} - 2\sigma$ , 10 级  $X_i > \bar{X} + 2\sigma$ , 中间每级间差  $0.5\sigma$ 。Shannon-wiener( $H'$ )遗传多样性指数公式:  $H' = -\sum P_i \times \ln P_i$ , 其中  $P_i$  为某一性状第  $i$  级时的频率<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 遗传多样性分析

2.1.1 表型性状的遗传多样性分析 对 117 份马铃薯高抗晚疫病种质资源的 20 个描述性状进行统计分析, 由表 3 可以看出, 20 个性状的各级别描述符基本都包括了马铃薯种质资源描述规范内记录的描述符, 只有花冠颜色、薯形、皮色、肉色、休眠性和熟性没有包含全部的描述符, 性状包含率在 45.5%~83.3% 之间, 20 个性状的遗传多样性指数变

表1 试验材料来源  
Table 1 Source of test materials

序号 Number	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	序号 Number	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	序号 Number	种质名称 Germplasm name	来源地 Source
1	388192-1	中国 China	40	MEX-750838	墨西哥 Mexico	79	呼 8216-14 Hu 8216-14	中国 China
2	388192-12	中国 China	41	Ns51-5	中国 China	80	呼 8331-3 Hu 8331-3	中国 China
3	390344-8	中国 China	42	NS8710049	中国 China	81	呼自 77-106 Huzi 77-106	中国 China
4	395021.82	CIP	43	NS880407	中国 China	82	呼自 79-16 Huzi 79-16	中国 China
5	61-9	中国 China	44	NS881705	中国 China	83	虎头 Hutou	中国 China
6	69-47.2	墨西哥 Mexico	45	PAMPEANA-INTA	中国 China	84	会 2 Hui 2	中国 China
7	And-69.1	墨西哥 Mexico	46	Poos-16	德国 Germany	85	金坑白 Jinkangbai	中国 China
8	Andina	秘鲁 Peru	47	Psp-30.1	美国 America	86	晋薯 3 号 Jinshu 3	中国 China
9	Arran Pilot	英国 England	48	R·S·churi	CIP	87	晋薯 4 号 Jinshu 4	中国 China
10	Atzimba	CIP	49	R1R3	CIP	88	靖县洋芋子 Jinxianyangyuzi	中国 China
11	Aula	德国 Germany	50	R2R3	CIP	89	抗病迟 Kangbingchi	中国 China
12	Bia(Nex32)	CIP	51	Robusta	德国 Germany	90	克新 13 号 Kexin 13	中国 China
13	BL-1.5	英国 England	52	T9615-1	中国 China	91	克新 18 号 Kexin 18	中国 China
14	BL-1c	英国 England	53	T9616-5	中国 China	92	肯德 Kende	CIP
15	BL-2.9	英国 England	54	T962-62	中国 China	93	老林洋芋 Laolinyangyu	中国 China
16	BR-63.5	美国 America	55	V2	CIP	94	凉 119-3 Liang 119-3	中国 China
17	BR-63.76	美国 America	56	Wn330-1	CIP	95	凉薯 14 Liangshu 14	中国 China
18	Brador	加拿大 Canada	57	Wulkan	波兰 Poland	96	凉薯 3 号 Liangshu 3	中国 China
19	BZURA	CIP	58	Агрономический	苏联 Soviet Union	97	凉薯 97 Liangshu 97	中国 China
20	CFK-69.1	危地马拉 Guatemala	59	Красноуфимский	苏联 Soviet Union	98	龙 761-24 Long 761-24	中国 China
21	Сеянеп420	苏联 Soviet Union	60	Фитофтороустойчивый	苏联 Soviet Union	99	南中 552 Nanzhong 552	中国 China
22	DY4-30	中国 China	61	安薯 56 号 Anshu 56	中国 China	100	内薯 7 号 Neishu 7	中国 China
23	DY4-5-10	中国 China	62	坝 58-27-混 2 Ba58-27-hun 2	中国 China	101	宁薯 5 号 Ningshu 5	中国 China
24	Gasore	卢旺达 Rwanda	63	川 771-56 Chuan 771-56	中国 China	102	青薯 168 Qingshu 168	中国 China
25	I-1085	CIP	64	川 9-87 Chuan 9-87	中国 China	103	沙杂 15 号 Shanza 15	中国 China
26	ICA ZIPA	CIP	65	春薯 4 号 Chunshu 4	中国 China	104	沙杂 1 号 Shaza 1	中国 China
27	INIAP FRIPAPA 99	CIP	66	大白花 Dabaihua	中国 China	105	同薯 5 号 Tongshu 5	中国 China

表 1(续)  
Table 1 (Continued)

序号 Number	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	序号 Number	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	序号 Number	种质名称 Germplasm name	来源地 Source
28	K314-4	CIP	67	大山包红皮 Dashanbaohongpi	中国 China	106	图强二号 Tuqiang 2	中国 China
29	LB GROUP X	CIP	68	东农 151 Dongnong 151	中国 China	107	万芋 9 号 Wanyu 9	中国 China
30	LBr-1	CIP	69	东农 304 Dongnong 304	中国 China	108	威 05 Wei 05	中国 China
31	LBr-2	CIP	70	鄂 684-1 E684-1	中国 China	109	威 06-2 Wei 06-2	中国 China
32	LBr-20	CIP	71	鄂 74-6-9 E74-6-9	中国 China	110	威 176 选 2 Wei 176 xuan 2	中国 China
33	LBr-25	CIP	72	鄂马铃薯 1 号 Emalingshu 1	中国 China	111	乌盟 684 Wumeng 684	中国 China
34	LBr-33	CIP	73	鄂马铃薯 3 号 Emalingshu 3	中国 China	112	小叶子 Xiaoyezi	中国 China
35	LBr-38	CIP	74	丰收 Fengshou	中国 China	113	新芋三号 Xinyu 3	中国 China
36	LBr-39	CIP	75	甘 65-11-36 Gan 65-11-36	中国 China	114	榆薯 CA Xushu CA	中国 China
37	LT-5	CIP	76	甘 71-19-19 Gan 71-19-19	中国 China	115	圆叶青 Yuanyeqing	中国 China
38	Marla	CIP	77	广灵里外黄 Guanglingliwaihuang	中国 China	116	长薯四号 Changshu 4	中国 China
39	MEX-750.821	墨西哥 Mexico	78	河坝洋芋 Hebayangyu	中国 China	117	Serrana-inta	CIP

注: CIP 为国际马铃薯中心。

Note: CIP means International Potato Center.

表 2 性状赋值表  
Table 2 Character assignment table

描述符 Descriptor	赋值代码 Assignment code	描述符 Descriptor	赋值代码 Assignment code
株型 Plant type	1:直立 Erect 2:半直立 Semi-erect 3:开展 Spreading	肉色 Flesh colour	1:白 White 2:红纹或紫纹 Red or purple-stripe 3:黄 Yellow 4:浅黄 Light yellow 5:乳白 Cream
茎色 Stem colour	1:褐 Brown 2:局部有色 Partial-colour 3:绿 Green 4:深紫 Dark purple 5:紫 Purple	芽眼深浅 Eye depth	1:浅 Shallow 2:深 Deep 3:中 Medium
叶色 Leaf colour	1:绿 Green 2:浅绿 Light green 3:深绿 Dark green	芽眼颜色 Eye colour	1:无色 Non-colour 2:有色 Colour
花冠形状 Corolla shape	1:近五边形 Pentagon 2:近圆形 Circle 3:星形 Star	芽眼多少 Eye number	1:多 Many 2:少 A few 3:中 Medium
花冠大小 Corolla size	1:大 Large 2:小 Small 3:中 Medium	薯皮光滑度 Skin smoothness	1:粗糙 Rough 2:光滑 Smooth 3:中 Medium
花冠颜色 Corolla colour	1:白 White 2:红紫 Red purple 3:蓝 Blue 4:蓝紫 Blue purple 5:紫 Purple	结薯集中性 Stolon length	1:分散 Long 2:集中 Short 3:中 Intermediate
花粉育性 Pollen fertility	1:不育 Sterile 2:低 Low 3:高 High 4:极高 Very high 5:中 Medium	块茎整齐度 Uniformity of tuber size	1:不整齐 Uneven 2:整齐 Uniform 3:中 Medium
天然结实性 Open-pollinated	1:极强 Very strong 2:强 Strong 3:弱 Weak 4:无 Nil 5:中 Medium	块茎大小 Tuber size	1:大 Large 2:小 Small 3:中 Medium
薯形 Tuber shape	1:扁椭圆 Flat elliptic 2:扁圆 Flat round 3:倒卵 Obovate 4:纺锤 Fusiform 5:卵形 Ovate 6:椭圆 Elliptic 7:圆形 Round 8:长筒 Long-oblong	休眠性 Dormancy	1:短 Short 2:长 Long 3:中 Medium
皮色 Skin colour	1:红 Red 2:黄 Yellow 3:浅红 Reddish 4:浅黄 Light yellow 5:乳白 Cream 6:深紫 Dark purple 7:紫 Purple	熟性 Maturity	1:晚熟 Late 2:早熟 Early 3:中晚熟 Middle late 4:中早熟 Middle early



表3 表型性状的性状包含率和多样性指数

Table 3 Inclusion rate and diversity index of phenotypic traits

表型性状 Phenotypic trait	规范描述 符个数 Number of specification descriptors	现有描述 符个数 Number of existing descriptors	性状包含率 Character inclusion rate/%	多样性 指数 Diversity index	表型性状 Phenotypic trait	规范描述 符个数 Number of specification descriptors	现有描述 符个数 Number of existing descriptors	性状包含率 Character inclusion rate/%	多样性 指数 Diversity index
株型 Plant type	3.00	3.00	100.00	0.90	花粉育性 Pollen fertility	5.00	5.00	100.00	1.54
茎色 Stem colour	5.00	5.00	100.00	1.53	天然结实性 Open-pollinated	5.00	5.00	100.00	1.49
叶色 Leaf colour	3.00	3.00	100.00	1.18	薯形 Tuber shape	17.00	8.00	47.00	1.55
花冠形状 Corolla shape	3.00	3.00	100.00	1.18	皮色 Skin colour	12.00	7.00	58.30	1.61
花冠大小 Corolla size	3.00	3.00	100.00	1.33	肉色 Flesh colour	11.00	5.00	45.50	1.18
花冠颜色 Corolla colour	8.00	5.00	62.50	1.28	芽眼深浅 Eye depth	3.00	3.00	100.00	0.92
块茎整齐度 Uniformity of tuber size	3.00	3.00	100.00	1.01	芽眼颜色 Eye colour	2.00	2.00	100.00	0.35
块茎大小 Tuber size	3.00	3.00	100.00	1.08	芽眼多少 Eye number	3.00	3.00	100.00	1.31
休眠性 Dormancy	4.00	3.00	75.00	1.21	薯皮光滑度 Skin smoothness	3.00	3.00	100.00	1.20
熟性 Maturity	6.00	5.00	83.30	1.34	结薯集中性 Stolon length	3.00	3.00	100.00	1.26

化范围为 0.35~1.61, 其中皮色的多样性指数最高, 芽眼颜色的多样性指数最低。根据质量性状各级别的表现频率(表 4)可知, 117 份高抗晚疫病种质资源, 株型以半直立为主, 茎色多为深色茎, 叶色深绿, 花多为中等大小的星形、白色花序, 花粉育性中等, 多数不结实, 薯形多样, 皮色表现从乳白到深紫的过渡色并且分布均匀, 肉色较浅, 芽眼浅无色, 芽眼数中等, 块茎光滑, 结薯集中且整齐, 以中大块茎为主, 休眠性中等, 多为中晚熟和晚熟品种。

2.1.2 数量性状遗传多样性分析 对 117 份马铃薯种质资源的 6 个数量性状进行统计分析(表 5), 发现 6 个数量性状均存在不同程度的变异, 变异系数范围在 16.50%~47.70%, 其中主茎数的变异系数最大, 淀粉含量的变异系数最小, 6 个数量性状变异系数大小排序依次为主茎数>块茎产量>株高>干物质含量>茎粗>淀粉含量, 遗传多样性指数变化范围为 0.99~1.50, 其中干物质含量最高, 表明该性状的遗传多样性最丰富, 块茎产量最低。变异系数和遗传多样性指数在各性状的表现不一致, 如块茎产量变异系数较高, 但多样性指数最小。

## 2.2 聚类分析

通过聚类分析(图 1), 可将整个高抗晚疫病初

级核心种质分为 4 类, 第 I 类群共包含 74 份材料, 占总材料的 63.25%, 主要包含来自国际马铃薯中心(CIP)、苏联、国内育成品种和地方品种, 株型直立和半直立, 平均株高 48.28 cm, 平均茎粗 1.01 cm, 茎色紫色居多, 花色白色和紫色, 花粉育性中等, 天然结实性较低, 皮色白色到紫色均有分布, 多样性丰富, 薯形多为椭圆、圆形和长筒形, 肉色乳白或黄色, 块茎大小中等, 平均产量 23 772 kg·hm<sup>-2</sup>, 熟期为中晚熟和晚熟, 包含 4 份中早熟材料, 平均干物质含量 21.00%, 平均淀粉含量 15.05%。第 II 类包含 19 份材料, 占总材料的 16.24%, 主要包含引自国外的品种, 株型半直立, 平均株高 54.35 cm, 平均茎粗 1.00 cm, 茎色多为褐色和紫色, 叶色多为深绿色, 花色白色和红紫色, 薯形圆形和椭圆形, 皮色包含红色、乳白和黄色, 芽眼浅, 薯皮光滑, 块茎大小中等、整齐, 平均产量 35 949 kg·hm<sup>-2</sup>, 熟性以晚熟为主, 包含 4 份中早熟品种, 平均干物质含量 20.34%, 平均淀粉含量 14.78%。第 III 类包含 20 份材料, 占总材料的 17.09%, 包含引自 CIP 和国内育成品种, 株型为半直立或直立, 平均株高 44 cm, 平均茎粗 0.99 cm, 茎色多为褐色和紫色, 叶色深绿色, 花色白色和红紫色, 薯形椭圆和圆形, 皮色以红色和浅红

表4 各性状表现频率

Table 4 Performance frequency of various traits

描述符 Descriptor	性状表现频率 Characteristic performance frequency							
	1	2	3	4	5	6	7	8
株型 Plant type	0.09	0.59	0.32					
茎色 Stem colour	0.21	0.27	0.01	0.15	0.35			
叶色 Leaf colour	0.41	0.03	0.56					
花冠形状 Corolla shape	0.17	0.05	0.78					
花冠大小 Corolla size	0.22	0.14	0.64					
花冠颜色 Corolla colour	0.53	0.26	0.03	0.03	0.16			
花粉育性 Pollen fertility	0.04	0.27	0.15	0.02	0.51			
天然结实性 Open-pollinated	0.06	0.09	0.17	0.46	0.22			
薯形 Tuber shape	0.02	0.19	0.01	0.02	0.04	0.38	0.27	0.08
皮色 Skin colour	0.01	0.09	0.36	0.06	0.22	0.22	0.04	
肉色 Flesh colour	0.42	0.01	0.32	0.24	0.02			
芽眼深浅 Eye depth	0.56	0.09	0.35					
芽眼颜色 Eye colour	0.89	0.11						
芽眼多少 Eye number	0.10	0.28	0.62					
薯皮光滑度 Skin smoothness	0.13	0.51	0.36					
结薯集中性 Stolon length	0.30	0.48	0.22					
块茎整齐度 Uniformity of tuber size	0.21	0.53	0.27					
块茎大小 Tuber size	0.30	0.27	0.43					
休眠性 Dormancy	0.04	0.36	0.60					
熟性 Maturity	0.47	0.19	0.21	0.09	0.04			

表5 数量性状数据统计分析

Table 5 Statistical analysis of quantitative trait data

性状 Trait	均值 Average	标准差 Standard deviation	极小值 Minimum	极大值 Maximum	方差 Variance	变异系数 Coefficient of variation/%	多样性指数 Diversity index
株高 Plant height/cm	48.99	9.77	23.00	90.00	95.36	19.90	1.07
主茎数 Number of main stem	5.25	2.50	1.00	15.00	6.26	47.70	1.24
茎粗 Stem diameter/cm	1.01	0.17	0.56	1.99	0.03	16.80	1.32
块茎产量 Tuber yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	24 508.02	10 086.81	2 886.00	66 643.00	1.02	41.20	0.99
w(干物质) Dry matter content/%	20.60	3.67	16.70	27.90	13.49	17.80	1.50
w(淀粉) Starch content/%	15.08	2.49	10.30	22.20	6.19	16.50	1.23

色为主,肉色以黄色为主,芽眼较深,薯皮光滑,结薯分散不整齐,平均产量 10 099 kg·hm<sup>-2</sup>,休眠性长,熟性多为晚熟,平均干物质含量 21.29%,平均淀粉含量 15.54%。第IV类包含 4 份材料,分别是引自 CIP 的 2 份材料和国内育成的 2 个品种,占总材料的 3.42%,株型为半直立,茎色绿色,叶色绿色,平均茎粗 1.11 cm,平均株高 57.59 cm,花色白色和紫

色,黄皮黄肉,芽眼浅,块茎大并且整齐,平均产量 56 923 kg·hm<sup>-2</sup>,熟性中晚熟,平均干物质含量 20.19%,平均淀粉含量 14.12%。

### 2.3 R8 分子标记检测

对 117 份高抗晚疫病马铃薯种质资源进行 R8 基因检测,发现含有 R8 分子标记的材料可以扩增出 682 bp 大小的特异性片段(图 2),有 13 份材料

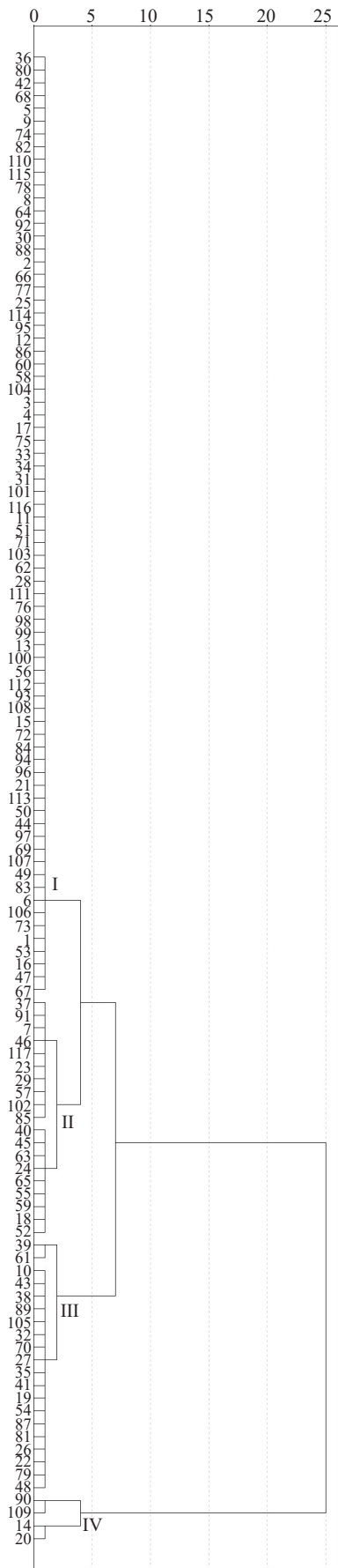
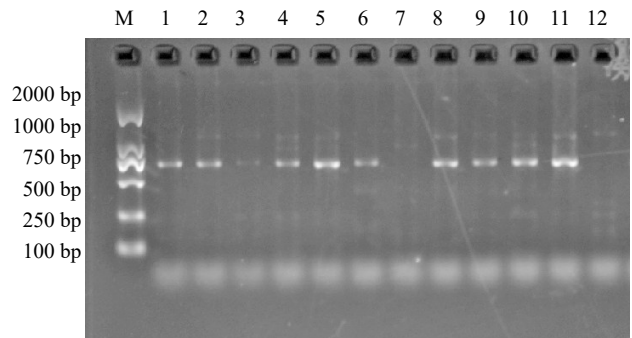


图1 聚类分析图  
Fig. 1 Cluster analysis



注: M. DL 2000 DNA Marker; 1~12 代表不同的马铃薯品种。

Note: M. DL 2000 DNA Marker; 1-12 represent different potato varieties.

图2 R8 基因分子标记检测  
Fig. 2 Detection of molecular marker of R8 gene

未含有 R8 基因(表 6),与晚疫病田间抗性鉴定结果符合率达到 88.89%,说明 R8 分子标记鉴定结果与田间晚疫病抗性符合程度较高,鉴定结果较准确,同时也表明国内高抗晚疫病马铃薯材料多数含有 R8 基因,其中不含有 R8 基因的 13 份抗性材料,其抗性可能由其他抗性基因决定,有待进一步研究。

### 3 讨论与结论

笔者通过对 117 份高抗晚疫病马铃薯种质资源的遗传多样性分析,发现我国现有的高抗晚疫病马铃薯种质资源的性状,包含了马铃薯种质资源描述规范内记录的大多数描述符,只有一些稀缺和特异性状未包含在内,皮色、肉色和薯形性状包含率较低,这是根据育种目标长期人为选择造成的结果。通过性状的表现频率可以看出,我国现有高抗马铃薯晚疫病种质资源性状主要表现为:株型以半直立为主,茎色多为深色茎,叶色深绿,花多为星形、白色花序,花粉育性中等,多数不结实,薯形多样,皮色表现从乳白到深紫的过渡色并且分布均匀,肉色较浅,芽眼浅无色,芽眼数中等,块茎光滑,结薯集中且整齐,以中大块茎为主,休眠性中等,多为中晚熟和晚熟品种。

20 个质量性状的遗传多样性指数变化范围为 0.35~1.61,平均值为 1.22,20 个性状中 10 个性状的多样性指数大于平均值,其中皮色的多样性指数最高,芽眼颜色的多样性指数最低。数量性状的遗传多样性指数变化范围为 0.99~1.50,其中干物质含量最高,块茎产量最低,变异系数范围在 16.5%~47.7%,其中主茎数和块茎产量的变异系数都在 40%以上,表明其受环境影响较大<sup>[13]</sup>,淀粉含量变异系数最小。不同性状的变异系数和遗传多样性指

表6 R8分子标记检测结果  
Table 6 Detection result of R8 molecular marker

序号 Number	种质名称 Germplasm name	R8 基因 R8 gene	序号 Number	种质名称 Germplasm name	R8 基因 R8 gene	序号 Number	种质名称 Germplasm name	R8 基因 R8 gene
1	388192-1	有 Have	40	MEX-750838	有 Have	79	呼 8216-14 Hu8216-14	有 Have
2	388192-12	无 Nothing	41	Ns51-5	有 Have	80	呼 8331-3 Hu8331-3	有 Have
3	390344-8	有 Have	42	NS8710049	有 Have	81	呼自 77-106 Huzi77-106	有 Have
4	395021.82	有 Have	43	NS880407	有 Have	82	呼自 79-16 Huzi79-16	无 Nothing
5	61-9	有 Have	44	NS881705	无 Nothing	83	虎头 Hutou	有 Have
6	69-47.2	有 Have	45	PAMPEANA-INTA	有 Have	84	会 2 Hui 2	有 Have
7	And-69.1	有 Have	46	Poos-16	有 Have	85	金坑白 Jinkangbai	有 Have
8	Andina	有 Have	47	Psp-30.1	无 Nothing	86	晋薯 3 号 Jinshu 3	有 Have
9	Arran Pilot	有 Have	48	R·S·churi	有 Have	87	晋薯 4 号 Jinshu 4	有 Have
10	Atzimba	有 Have	49	R1R3	有 Have	88	靖县洋芋子 Jinxianyangyuzi	有 Have
11	Aula	有 Have	50	R2R3	有 Have	89	抗病迟 Kangbingchi	有 Have
12	Bia(Nex32)	有 Have	51	Robusta	有 Have	90	克新 13 号 Kexin 13	有 Have
13	BL-1.5	有 Have	52	T9615-1	有 Have	91	克新 18 号 Kexin 18	有 Have
14	BL-1c	有 Have	53	T9616-5	有 Have	92	肯德 Kende	有 Have
15	BL-2.9	有 Have	54	T962-62	无 Nothing	93	老林洋芋 Laolinyangyu	有 Have
16	BR-63.5	有 Have	55	V2	无 Nothing	94	凉 119-3 Liang 119-3	有 Have
17	BR-63.76	有 Have	56	Wn330-1	有 Have	95	凉薯 14 Liangshu 14	有 Have
18	Brador	有 Have	57	Wulkan	有 Have	96	凉薯 3 号 Liangshu 3	有 Have
19	BZURA	无 Nothing	58	Агрономический	无 Nothing	97	凉薯 97 Liangshu 97	有 Have
20	CFK-69.1	有 Have	59	Красноуфимский	有 Have	98	龙 761-24 Long 761-24	有 Have
21	Сеянеп420	有 Have	60	Фитофтороустойчивый	有 Have	99	南中 552 Nanzhong 552	有 Have
22	DY4-30	有 Have	61	安薯 56 号 Anshu 56	有 Have	100	内薯 7 号 Neishu 7	有 Have
23	DY4-5-10	有 Have	62	坝 58-27-混 2 Ba58-27-hun2	有 Have	101	宁薯 5 号 Ningshu 5	无 Nothing
24	Gasore	有 Have	63	川 771-56 Chuan771-56	有 Have	102	青薯 168 Qingshu 168	有 Have
25	I-1085	有 Have	64	川 9-87 Chuan 9-87	有 Have	103	沙杂 15 号 Shanza 15	有 Have
26	ICA ZIPA	有 Have	65	春薯 4 号 Chunshu 4	有 Have	104	沙杂 1 号 Shaza 1	有 Have



表 6(续)  
Table 6 (Continued)

序号 Number	种质名称 Germplasm name	R8 基因 R8 gene	序号 Number	种质名称 Germplasm name	R8 基因 R8 gene	序号 Number	种质名称 Germplasm name	R8 基因 R8 gene
27	INIAP FRIPAPA 99	有 Have	66	大白花 Dabaihua	有 Have	105	同薯 5 号 Tongshu 5	有 Have
28	K314-4	有 Have	67	大山包红皮 Dashanbaohongpi	有 Have	106	图强二号 Tuqiang 2	有 Have
29	LB GROUP X	有 Have	68	东农 151 Dongnong 151	有 Have	107	万芋 9 号 Wanyu 9	有 Have
30	LBr-1	有 Have	69	东农 304 Dongnong 304	无 Nothing	108	威 05 Wei 05	有 Have
31	LBr-2	有 Have	70	鄂 684-1 E684-1	有 Have	109	威 06-2 Wei 06-2	有 Have
32	LBr-20	无 Nothing	71	鄂 74-6-9 E74-6-9	有 Have	110	威 176 选 2 Wei 176 xuan 2	有 Have
33	LBr-25	有 Have	72	鄂马铃薯 1 号 Emalingshu 1	有 Have	111	乌盟 684 Wumeng 684	有 Have
34	LBr-33	有 Have	73	鄂马铃薯 3 号 Emalingshu 3	有 Have	112	小叶子 Xiaoyezi	有 Have
35	LBr-38	有 Have	74	丰收 Fengshou	有 Have	113	新芋三号 Xinyu 3	无 Nothing
36	LBr-39	有 Have	75	甘 65-11-36 Gan 65-11-36	有 Have	114	榆薯 CA Xushu CA	有 Have
37	LT-5	无 Nothing	76	甘 71-19-19 Gan 71-19-19	有 Have	115	圆叶青 Yuanyeqing	有 Have
38	Marla	有 Have	77	广灵里外黄 Guanglingliwaihuang	有 Have	116	长薯四号 Changshu 4	有 Have
39	MEX-750.821	有 Have	78	河坝洋芋 Hebayangyu	有 Have	117	Serrana-inta	有 Have

数表现并不一致,如块茎产量多样性指数最低,但变异系数达到 41.2%,主要原因是他们反映遗传变异的内涵不同,变异系数反映的是某一性状的变异范围,而多样性指数则指该性状的不同表现等级和数量分布<sup>[14]</sup>。

通过聚类分析将 117 份试验材料分为 4 类,第 I 类包含材料比较丰富,这一类材料以国内外育成品种为主,受育种目标的影响,主要表现株高较矮,薯形规整,块茎整齐,熟性包括中早熟、中晚熟和晚熟品种,淀粉和干物质含量较高,整体性状表现优良,比较符合现有栽培品种的性状特点。第 II 类材料主要表现为植株较高,茎色以紫色为主,产量性状表现较好,我国育成的生产上栽培面积较大的克新 18 号、青薯 168、抗疫白和春薯 4 号被聚在这一类,可作为晚疫病抗性育种的直接亲本材料。第 III 类资源主要性状表现为植株生长势较弱,主茎数较多,叶片小,晚熟,短日照类型较多,淀粉含量和干物质含量最高,可作为抗性育种的抗原材料。第 IV 类包含 4 份资源,其产量表现最高,可直接用于生产和

作为育种亲本材料。通过聚类分析将 117 份试验材料根据表型特点、地理分布和亲缘关系进行了很好的区分,弥补了凭经验分类或以少数性状进行直观评价的不足,也为马铃薯杂交育种亲本选配提供了参考。

优异抗病种质资源是培育抗病品种的基础,现阶段抗病基因的发掘和多个抗病基因聚合是筛选和创造具有持久抗病性种质资源材料的重要手段,随着 *R1*、*R2*、*R3a*、*R3b*、*R8* 抗病基因的克隆,并开发了相应的分子标记应用于分子标记辅助育种,因此,聚合多个 *Rpi* 基因,尤其是广谱 *Rpi* 基因,创造具有广谱抗性的遗传材料成为可能<sup>[15-22]</sup>。笔者通过对 117 份高抗晚疫病马铃薯种质资源进行 *R8* 基因检测,发现 104 份资源含有 *R8* 基因,与晚疫病田间抗性鉴定结果符合率达到 88.89%,明确了 104 份高抗晚疫病种质资源具有 *R8* 抗病基因。田间表现高抗,检测结果不含有 *R8* 基因的 13 份材料,后续将采用多种晚疫病抗性基因进行检测,明确其抗性机制,筛选出含有更多抗性基因的抗晚疫病种质资

源,为今后的马铃薯抗晚疫病聚合育种提供优异资源。

综上所述,117份高抗晚疫病马铃薯种质资源包含了马铃薯种质资源描述规范内记录的大多数描述符,质量性状遗传多样性指数变化范围为0.35~1.61,50%性状的多样性指数大于平均值,数量性状遗传多样性指数变化范围为0.99~1.50,变异系数范围在16.50%~47.70%,通过系统聚类将117份高抗晚疫病马铃薯种质资源分为4类,各类型群体特点鲜明,可应用于马铃薯晚疫病抗性育种及大田生产。通过R8抗性基因鉴定,117份试验材料中104份含有R8抗性基因,与晚疫病田间抗性鉴定结果符合率达到88.89%。研究结果可为高抗晚疫病马铃薯种质资源的高效利用提供理论依据。

### 参考文献

- [1] 刘喜才,张丽娟,张文英.马铃薯种质资源描述规范和数据标准[J].北京:中国农业出版社,2006.
- [2] 国家统计局[EB/OL].[2024-01-12].<https://data.stats.gov.cn/>.
- [3] 高玉林,徐进,刘宁,等.我国马铃薯病虫害发生现状与防控策略[J].植物保护,2019,45(5):106-111.
- [4] 侯忠艳.马铃薯晚疫病症状识别及综合防治措施[J].科技咨询导报,2007(20):247.
- [5] 李洁,闫硕,张芳,等.近年来中国马铃薯晚疫病的时空演变特征及防控情况分析[J].植物保护学报,2021,48(4):703-711.
- [6] 黄冲,刘万才.近几年我国马铃薯晚疫病流行特点分析与监测建议[J].植物保护,2016,42(5):142-147.
- [7] 吴秋云,黄科,刘明月,等.马铃薯晚疫病抗病基因研究进展[J].中国马铃薯,2014,28(3):175-179.
- [8] 徐进,朱杰华,杨艳丽,等.中国马铃薯病虫害发生情况与农药使用现状[J].中国农业科学,2019,52(16):2800-2808.
- [9] JO K R, ARENS M, KIM T Y, et al. Mapping of the *S. demissum* late blight resistance gene R8 to a new locus on chromosome IX[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2011, 123(8): 1331-1340.
- [10] LINDQVIST-KREUZE H, GASTELO M, PEREZ W, et al. Phenotypic stability and genome-wide association study of late blight resistance in potato genotypes adapted to the tropical highlands[J]. Phytopathology, 2014, 104(6): 624-633.
- [11] 刘勋,郑克邪,张娇,等.马铃薯晚疫病抗性基因分子标记检测及抗性评价[J].植物遗传资源学报,2019,20(3):538-549.
- [12] 段绍光.马铃薯种质资源遗传多样性评价和重要性状的遗传分析[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [13] 全成哲,李淑芳,李鹤南,等.吉林省73份审定水稻品种的表型性状遗传多样性研究[J].作物杂志,2024(3):64-75.
- [14] CARMANOVA S, ALVAREZ J B, CABALLERO L. Genetic diversity for morphological traits and seed storage proteins in Spanish rivet wheat[J]. Biology Plantarum, 2010, 54(1): 69-75.
- [15] BALLVORA A, ERCOLANO M R, WEISS J, et al. The *R1* gene for potato resistance to late blight (*Phytophthora infestans*) belongs to the leucine zipper/NBS/LRR class of plant resistance genes[J]. Plant Journal, 2022, 30(3): 361-351.
- [16] LOKOSSOU A A, PARK T, ARKEL G V, et al. Exploiting knowledge of R/Avr genes to rapidly clone new LZ-NBS-LRR family of late blight resistance genes from potato linkage group IV[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2009, 22(6): 630-641.
- [17] HYOUN J K, HEUNG R L, KWANG R J, et al. Broad spectrum late blight resistance in potato differential set plants Ma R8 and Ma R9 is conferred by multiple stacked R genes[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2012, 124(5): 923-935.
- [18] JIANG R, LI J, TIAN Z, et al. Potato late blight field resistance from QTL *dPI09c* is conferred by the NB-LRR gene *R8*[J]. Journal of Experimental Botany, 2018, 69(7): 1545-1555.
- [19] 李红军.分子标记辅助选择创制聚合晚疫病抗病基因 *Pta1* 和 *R8* 的马铃薯种质[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [20] 聂佳惠.R8分子标记辅助选择马铃薯晚疫病抗性单株[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [21] 李锬.马铃薯广谱 *Rpi* 基因分子标记辅助选择及抗性种质创制[D].昆明:云南农业大学,2023.
- [22] 刘程,王世尧,史伟玲,等.马铃薯抗晚疫病基因 *R8*、*RB* 和抗病病毒病基因 *Rx1*、*Ry<sub>adg</sub>* 的多重 PCR 检测[J].园艺学报,2021, 48(2): 389-396.