

伊犁天山 160 份野苹果种质资源表型 性状的遗传多样性分析

张学超¹, 任海龙², 唐式敏¹, 朱玲¹, 张胜军¹, 冉昇¹

(¹伊犁哈萨克自治州农业科学研究所, 伊宁 835000; ²广州市农业科学研究院, 广州 510308)

摘要: 本研究对伊犁天山地区 160 份新疆野苹果种质资源, 14 个表型性状进行了评价鉴定, 并筛选了特异种质。结果表明, 14 个表型性状的变异系数为 5.75%~38.44%, 平均为 21.78%, 果实硬度的变异系数最大, 果形指数的变异系数最小; Shannon-Weiner 多样性指数分布为 1.95~2.06, 平均为 2.01, 多数性状具有丰富的遗传多样性; 160 份野苹果种质资源的隶属函数均值分布在 0.202~0.674 之间, 平均为 0.486, 其中 20 份资源的隶属函数均值大于 0.6, 在单果重、果实硬度、果实纵径、果实横径等方面有明显优势; 相关性分析表明, 单果重与果实纵径、横径、果梗粗、果实硬度呈显著正相关, 与可溶性固形物含量和果梗长呈显著负相关; 主成分分析结果表明, 5 个主成分因子的累计贡献率达 79.258%, 其中第 1 主成分与果实性状有关, 第 2 主成分与叶片性状有关, 第 3 主成分与枝条性状有关, 第 4 主成分与果实性状和枝条性状有关, 第 5 主成分与果梗性状有关; 依据 14 个表型性状可将 160 份种质资源分为 6 个类群, 其中, 第Ⅱ类群的单果重最大, 第Ⅲ类群的果实硬度最大, 第Ⅴ类群的可溶性固形物含量最大。本研究结果可为新疆野苹果种质资源的保护和利用提供重要参考。

关键词: 野苹果; 种质资源; 表型性状; 遗传多样性

Genetic Diversity Analysis of Phenotypic Traits in 160 Germplasm Resources of *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem. from Tianshan in Ili

ZHANG Xue-chao¹, REN Hai-long², TANG Shi-min¹, ZHU Ling¹, ZHANG Sheng-jun¹, RAN Bian¹

(¹Institute of Agricultural Sciences of Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Yining 835000;

²Guangzhou Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510308)

Abstract: In this study, 14 phenotypic traits of 160 wild apple (*Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.) germplasm resources in Tianshan area of Ili were evaluated, from which elite germplasms were screened. The results showed that the variation coefficients of the 14 phenotypic traits ranged from 5.75% to 38.44%, with an average of 21.78%, the variation coefficient of fruit hardness was the highest, and the fruit shape index was the lowest. The Shannon-Weiner diversity index ranged from 1.95 to 2.06, with an average of 2.01, and most of the traits were rich in genetic diversity. The mean of membership function of the 160 germplasm resources ranged from 0.202 to 0.674, with a mean value of 0.486, among which 20 resources had the value greater than 0.6, with obvious advantages in fruit weight, fruit hardness and fruit size. Correlation analysis showed that the fruit weight was significantly positively correlated with fruit length, fruit diameter, stalk diameter and fruit hardness, and significantly negatively correlated with soluble solids content and stalk length. The results of principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of 5 principal component factors was 79.258%, among

收稿日期: 2021-04-15 修回日期: 2021-05-07 网络出版日期: 2021-05-21

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210415002>

第一作者研究方向为果树种质资源保护与利用, E-mail: zhangxuechao678@163.com

通信作者: 任海龙, 研究方向为作物遗传育种, E-mail: renhailong_2006@163.com

基金项目: 农作物种质资源保护与利用专项 (19200380)

Foundation project: Earmarked Fund for Protection and Utilization of Crop Germplasm Resources (19200380)

which the first principal component was related to fruit traits, the second principal component was related to leaf traits, the third principal component was related to branch traits, the fourth principal component was related to fruit traits and branch traits, and the fifth principal component was related to fruit stalk traits. Based on the 14 phenotypic traits, the 160 germplasm resources were divided into 6 groups, among which group II had the highest fruit weight, group III had the highest fruit hardness, and group V had the highest soluble solids content. The results of this study would provide important references for conservation and utilization of the wild apple germplasm resources.

Key words: *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.; germplasm resources; phenotypic traits; genetic diversity

新疆野苹果 (*Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.) 又名塞威氏苹果或天山苹果, 是蔷薇科 (Rosaceae) 苹果亚科 (Maloideae) 苹果属 (*Malus* Mill.) 植物^[1-2], 主要分布于环天山山脉的中国新疆伊犁州、吉尔吉斯斯坦伊塞克湖州、哈萨克斯坦塔塔尔迪库尔干州和阿拉木图州等地^[3]。在我国伊犁地区则主要分布在巩留县、新源县和霍城县的野果林内^[4]。前人研究认为栽培苹果 (*Malus domestica* (Suckow) Borkh.) 是 4000~10000 年前, 由天山山脉的野苹果 *M. sieversii* (Ledeb.) M. Roem. 驯化而来, 并沿古丝绸之路自中亚向西欧交流, 经过不断演化最后形成了当今的栽培苹果^[5]。全基因组测序结果表明, 栽培苹果 (*M. domestica* (Suckow) Borkh.) 基因组中有 28%~40% 来源于新疆野苹果 (*M. sieversii* (Ledeb.) M. Roem.), 有 25%~37% 源自欧洲森林苹果 (*M. sylvestris* Mill.), 栽培苹果的杂合基因组中同时源自于两个祖先种的占了 23%, 其中栽培苹果的果实大小主要遗传自新疆野苹果^[6], 说明新疆野苹果在现代栽培苹果的驯化过程中起着举足轻重的作用。

新疆野苹果是我国经济林资源中唯一天然的基因库, 也是世界野苹果基因库的重要组成部分, 具有重要的科研和保护价值^[7]。主要表现在: (1) 新疆野苹果的变异类型十分丰富, 对于栽培苹果的良好繁育、新品种培育以及栽培苹果的起源及演变规律研究都有非常重大的意义^[1,8]。(2) 新疆野苹果具有抗寒、抗旱、耐病虫和耐盐碱等优良抗逆性状, 同时又有亲和力强和种源丰富的特点^[9-10]。(3) 新疆野苹果果实中维生素含量以及生物活性物质普遍高于栽培品种, 营养价值非常高^[11-12]。(4) 新疆野苹果作为砧木是快速扩大栽培苹果面积的重要途径^[1]。(5) 新疆野苹果还可作为优良的园林绿化树种^[13]。因此, 本研究以伊犁天山地区的 160 份野苹果种质资源为材料, 基于 14 个表型性状进行了遗传多样性的鉴定评价, 对于今后原生地野苹果资源的保护, 充分发挥伊犁野苹果资源的特性和潜力具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料来自国家果树种质新疆野苹果种质资源圃, 共 160 份。所用材料于 2010-2012 年收集自新疆伊犁天山野果林, 其中巩留县 60 份, 霍城县 40 份, 新源县 60 份。考察收集的种质资源采用芽接的方式进行保存, 砧木为长势一致的新疆野苹果实生苗, 嫁接苗 2013 年开始结果, 2017 年稳定结果。试验材料的具体信息见表 1。新疆伊犁野苹果种质资源圃位于伊宁市东郊。资源栽植区的土壤为灰钙土, 土壤 pH 值为 7.83, 土壤有机质含量 21.2 g/kg, 全氮含量 0.52 g/kg, 全磷含量 2.65 g/kg, 碱解氮含量 61.35 mg/kg, 速效磷含量 36.67 mg/kg, 速效钾含量 165.35 mg/kg。

1.2 试验方法

本试验于 2019-2020 年连续 2 年对野苹果种质资源的果实、枝条和叶片的表型性状进行测定。参照《苹果种质资源描述规范和数据标准》^[14]的方法, 调查的指标有单果重、果梗粗、果梗长、可溶性固形物含量、果实硬度、果实纵径、果实横径、果形指数、一年生枝条长度、一年生枝条节间长度、一年生枝条粗度、叶柄长度、叶片长度和宽度等。

通过 Excel 2017 处理各性状的数据, 并计算各性状的最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数和多样性指数。采用 DPS16.05 数据处理系统进行相关性分析、主成分分析和系统聚类分析 (参数设置为: 标准化转换——欧氏距离——离差平方和法)。Shannon-Weiner 多样性指数 (H'): 先计算试验材料总体平均数 (\bar{X}) 和标准差 (σ), 然后划分为 10 级, 从第一级 [$Xi < (\bar{X} - 2\sigma)$] 到第十级 [$Xi > (\bar{X} + 2\sigma)$], 每 0.5σ 为一级, 通过公式 $H' = -\sum Pi \ln Pi$ (其中 Pi 为某一性状在第 i 个级别出现的频率) 计算各性状的 Shannon-Weiner 多样性指数 (H')^[15]。隶属函数 $R(Xi) = (Xi - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, Xi 为指标测定值, X_{\max} 、 X_{\min} 为所有参试材料某一指标的最大值和最小值^[16-17]。

表 1 试验材料名称及来源

Table 1 Materials and their sources

| 编号 Number | 名称 Name | 来源 Source | 编号 Number | 名称 Name | 来源 Source | 编号 Number | 名称 Name | 来源 Source | 编号 Number | 名称 Name | 来源 Source |
|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| 1 | GB-2 | 巩留 | 41 | GJS-6 | 巩留 | 81 | HDM-29 | 霍城 | 121 | XY-29 | 新源 |
| 2 | GB-3 | 巩留 | 42 | GJS-7 | 巩留 | 82 | HDM-30 | 霍城 | 122 | XY-30 | 新源 |
| 3 | GB-4 | 巩留 | 43 | GJS-8 | 巩留 | 83 | HDM-34 | 霍城 | 123 | XY-31 | 新源 |
| 4 | GB-5 | 巩留 | 44 | GJS-9 | 巩留 | 84 | HDM-35 | 霍城 | 124 | XY-34 | 新源 |
| 5 | GB-6 | 巩留 | 45 | GJS-10 | 巩留 | 85 | HDM-36 | 霍城 | 125 | XY-38 | 新源 |
| 6 | GB-7 | 巩留 | 46 | GJS-11 | 巩留 | 86 | HDM-37 | 霍城 | 126 | XY-39 | 新源 |
| 7 | GB-8 | 巩留 | 47 | GJS-12 | 巩留 | 87 | HDM-38 | 霍城 | 127 | XY-41 | 新源 |
| 8 | GB-9 | 巩留 | 48 | GJS-13 | 巩留 | 88 | HDM-39 | 霍城 | 128 | XY-42 | 新源 |
| 9 | GB-10 | 巩留 | 49 | GJS-14 | 巩留 | 89 | HDM-40 | 霍城 | 129 | XY-43 | 新源 |
| 10 | GB-12 | 巩留 | 50 | GJS-15 | 巩留 | 90 | HDM-41 | 霍城 | 130 | XY-44 | 新源 |
| 11 | GB-13 | 巩留 | 51 | GJS-16 | 巩留 | 91 | HDM-42 | 霍城 | 131 | XY-45 | 新源 |
| 12 | GB-14 | 巩留 | 52 | GJS-17 | 巩留 | 92 | HDM-46 | 霍城 | 132 | XY-46 | 新源 |
| 13 | GB-15 | 巩留 | 53 | GJS-18 | 巩留 | 93 | HDM-47 | 霍城 | 133 | XY-47 | 新源 |
| 14 | GB-16 | 巩留 | 54 | GJS-19 | 巩留 | 94 | HDM-48 | 霍城 | 134 | XY-48 | 新源 |
| 15 | GB-17 | 巩留 | 55 | GJS-20 | 巩留 | 95 | HG-1 | 霍城 | 135 | XY-49 | 新源 |
| 16 | GB-18 | 巩留 | 56 | GQ-1 | 巩留 | 96 | HG-2 | 霍城 | 136 | XY-51 | 新源 |
| 17 | GB-19 | 巩留 | 57 | GX-1 | 巩留 | 97 | HG-3 | 霍城 | 137 | XY-53 | 新源 |
| 18 | GB-20 | 巩留 | 58 | GX-2 | 巩留 | 98 | HG-4 | 霍城 | 138 | XY-54 | 新源 |
| 19 | GB-21 | 巩留 | 59 | GX-3 | 巩留 | 99 | HG-5 | 霍城 | 139 | XY-55 | 新源 |
| 20 | GB-22 | 巩留 | 60 | GX-4 | 巩留 | 100 | HG-6 | 霍城 | 140 | XY-56 | 新源 |
| 21 | GB-23 | 巩留 | 61 | HDM-1 | 霍城 | 101 | MEG-6 | 新源 | 141 | XY-57 | 新源 |
| 22 | GB-24 | 巩留 | 62 | HDM-5 | 霍城 | 102 | XY-2 | 新源 | 142 | XY-58 | 新源 |
| 23 | GB-25 | 巩留 | 63 | HDM-7 | 霍城 | 103 | XY-3 | 新源 | 143 | XY-61 | 新源 |
| 24 | GD-3 | 巩留 | 64 | HDM-11 | 霍城 | 104 | XY-5 | 新源 | 144 | XY-62 | 新源 |
| 25 | GD-5 | 巩留 | 65 | HDM-12 | 霍城 | 105 | XY-6 | 新源 | 145 | XY-63 | 新源 |
| 26 | GD-7 | 巩留 | 66 | HDM-13 | 霍城 | 106 | XY-7 | 新源 | 146 | XY-65 | 新源 |
| 27 | GD-8 | 巩留 | 67 | HDM-14 | 霍城 | 107 | XY-8 | 新源 | 147 | XY-67 | 新源 |
| 28 | GD-9 | 巩留 | 68 | HDM-15 | 霍城 | 108 | XY-9 | 新源 | 148 | XY-68 | 新源 |
| 29 | GD-10 | 巩留 | 69 | HDM-16 | 霍城 | 109 | XY-10 | 新源 | 149 | XY-69 | 新源 |
| 30 | GD-11 | 巩留 | 70 | HDM-17 | 霍城 | 110 | XY-11 | 新源 | 150 | XY-75 | 新源 |
| 31 | GD-12 | 巩留 | 71 | HDM-18 | 霍城 | 111 | XY-12 | 新源 | 151 | XY-76 | 新源 |
| 32 | GD-14 | 巩留 | 72 | HDM-19 | 霍城 | 112 | XY-16 | 新源 | 152 | XY-77 | 新源 |
| 33 | GD-15 | 巩留 | 73 | HDM-20 | 霍城 | 113 | XY-17 | 新源 | 153 | XY-79 | 新源 |
| 34 | GD-16 | 巩留 | 74 | HDM-21 | 霍城 | 114 | XY-18 | 新源 | 154 | XY-82 | 新源 |
| 35 | GD-17 | 巩留 | 75 | HDM-22 | 霍城 | 115 | XY-20 | 新源 | 155 | XY-85 | 新源 |
| 36 | GD-18 | 巩留 | 76 | HDM-23 | 霍城 | 116 | XY-21 | 新源 | 156 | XY-87 | 新源 |
| 37 | GD-25 | 巩留 | 77 | HDM-25 | 霍城 | 117 | XY-23 | 新源 | 157 | XY-89 | 新源 |
| 38 | GD-26 | 巩留 | 78 | HDM-26 | 霍城 | 118 | XY-26 | 新源 | 158 | XY-90 | 新源 |
| 39 | GJS-3 | 巩留 | 79 | HDM-27 | 霍城 | 119 | XY-27 | 新源 | 159 | XY-95 | 新源 |
| 40 | GJS-5 | 巩留 | 80 | HDM-28 | 霍城 | 120 | XY-28 | 新源 | 160 | 苹果王 | 新源 |

2 结果与分析

2.1 野苹果种质资源表型性状的多样性分析

由表 2 可知,160 份野苹果种质资源的 14 个表型性状差异明显,变异系数为 5.75%~38.44%,平均为 21.78%,其中果实硬度的变异系数最大,为 38.44%,其次为单果重的变异系数,为 38.28%,表明这 2 个表型性状具有较大的离散程度。果形指数

的遗传变异程度最低,变异系数仅为 5.75%。14 个表型性状的遗传多样性指数 H' 分布在 1.95~2.06 之间,平均遗传多样性指数为 2.01,其中果实纵径的遗传多样性指数最高,为 2.06,其次为单果重、果实横径、果实硬度,最小的是一年生枝条长度和一年生枝条节间长度。综合各表型性状的变异系数和遗传多样性指数,单果重和果实硬度呈现出明显的遗传差异性。

表 2 野苹果种质资源表型性状变异情况

Table 2 Phenotypic variation of traits of the wild apple germplasm resources

| 性状 Trait | 最大值 Max. | 最小值 Min. | 平均值 Mean | 极差 Range | 标准差 SD | 变异系数(%) CV | 多样性指数 H' |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|---------------|---------------|
| 单果重(g) Fruit weight | 56.56 | 5.88 | 25.26 | 50.68 | 9.67 | 38.28 | 2.05 |
| 果梗粗(mm) Stalk diameter | 2.79 | 0.63 | 1.60 | 2.17 | 0.32 | 20.28 | 2.01 |
| 果梗长(mm) Stalk length | 34.35 | 6.64 | 18.41 | 27.71 | 5.00 | 27.17 | 2.04 |
| 可溶性固形物含量(%) Soluble solids content | 14.93 | 7.15 | 11.27 | 7.78 | 1.33 | 11.80 | 2.04 |
| 果实硬度(kg/cm ²) Fruit hardness | 10.38 | 1.50 | 4.94 | 8.88 | 1.90 | 38.44 | 2.04 |
| 果实纵径(mm) Fruit length | 46.35 | 20.71 | 33.67 | 25.64 | 5.04 | 14.96 | 2.06 |
| 果实横径(mm) Fruit diameter | 53.43 | 25.23 | 39.85 | 28.20 | 5.85 | 14.69 | 2.05 |
| 果形指数 Fruit shape index | 1.00 | 0.69 | 0.85 | 0.30 | 0.05 | 5.75 | 2.02 |
| 一年生枝条长度(cm) Length of 1-year-old branch | 38.60 | 10.40 | 18.91 | 28.20 | 5.37 | 28.39 | 1.95 |
| 一年生枝条节间长度(cm) Internode length of 1-year-old branch | 3.03 | 0.62 | 2.18 | 2.41 | 0.44 | 19.99 | 1.95 |
| 一年生枝条粗度(mm) Diameter of 1-year-old branch | 5.22 | 1.12 | 3.29 | 4.10 | 0.67 | 20.31 | 1.98 |
| 叶柄长度(mm) Petiole length | 35.94 | 6.07 | 21.91 | 29.87 | 5.02 | 22.92 | 2.00 |
| 叶片长度(mm) Leaf length | 99.72 | 16.16 | 69.73 | 83.56 | 14.59 | 20.93 | 1.97 |
| 叶片宽度(mm) Leaf width | 58.12 | 10.35 | 41.42 | 47.77 | 8.70 | 21.01 | 1.98 |

2.2 野苹果种质资源隶属函数分析

通过野苹果各性状隶属函数的平均值(详见 <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210415002>, 附表 1),可以评价 160 份野苹果种质资源综合性状的优劣,再根据具体性状的隶属函数均值,确定主要优势性状。本研究中 160 份野苹果种质资源的隶属函数均值介于 0.202~0.674 之间,隶属函数均值大于 0.6 的有 20 份资源,其中霍城的有 11 份,新源的有 6 份,巩留的有 3 份,这些资源在单果重、果实硬度、果实纵径、果实横径等方面有明显优势;隶属函数均值介于 0.5~0.6 之间的有 82 份,其中巩留的有 26 份,霍城的有 22 份,新源的有 34 份;隶属函数均值介于 0.4~0.5 之间的有 43 份,其中巩留的有 18 份,霍城的有 7 份,新源的有 18 份;隶属函数均值介于 0.2~0.4 之间的有 15 份,其中巩留的有 13 份,新源的有 2 份,这些隶属函数均值低的材料表型性状不具有优势。

2.3 野苹果种质资源表型性状的相关性分析

14 个表型性状相关性分析(表 3)表明,单果重与果实纵径、果实横径、果实硬度、果梗粗、一年生枝条节间长度、叶片长度和宽度呈显著正相关,与可溶性固形物含量和果梗长呈显著负相关。果梗粗与果实硬度、果实纵径、果实横径、一年生枝条长度、一年生枝条节间长度、叶片长度和宽度呈显著正相关,与果梗长和可溶性固形物含量呈显著负相关。果梗长与果实硬度、果实纵径、果实横径、一年生枝条节间长度、叶片长度和宽度呈显著负相关。可溶性固形物含量与果实硬度、果实纵径、果实横径呈显著负相关。果实硬度与果实纵径、果实横径、一年生枝条长度、一年生枝条节间长度、一年生枝条粗度、叶片长度和宽度呈显著正相关,与果形指数呈显著负相关。综合相关性分析的结果可以看出,单果重、果实硬度、果实纵径和果实横径这些高隶属函数均值材料的特征性状,相互间具有极显著的正相关性,同时这 4 个表型性状也是遗传多样性最丰富的性状。

表 3 野苹果种质资源各性状的相关性
Table 3 Correlation between the traits of wild apple germplasm resources

| 性状 Trait | 单果重 Fruit weight | 果梗粗 Stalk diameter | 果梗长 Stalk length | 可溶性固形物含量 Soluble solids content | 果实硬度 Fruit hardness | 果实纵径 Fruit length | 果实横径 Fruit diameter | 果形指数 Fruit shape index | 一年生枝条长度 Length of 1-year-old branch | 一年生枝条粗度 Diameter of 1-year-old branch | 叶柄长 Petiole length | 叶片长 Leaf length | 叶片宽度 Leaf width |
|--|---------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|--|--|-----------------------|--------------------|--------------------|
| 单果重 Fruit weight | 1.000 | | | | | | | | | | | | |
| 果梗粗 Stalk diameter | 0.560** | 1.000 | | | | | | | | | | | |
| 果梗长 Stalk length | -0.190* | -0.381** | 1.000 | | | | | | | | | | |
| 可溶性固形物含量 Soluble solids content | -0.342** | -0.205** | 0.102 | 1.000 | | | | | | | | | |
| 果实硬度 Fruit hardness | 0.513** | 0.403** | -0.255** | -0.265** | 1.000 | | | | | | | | |
| 果实纵径 Fruit length | 0.931** | 0.515** | -0.217** | -0.351** | 0.471** | 1.000 | | | | | | | |
| 果实横径 Fruit diameter | 0.962** | 0.544** | -0.228** | -0.366** | 0.550** | 0.929** | 1.000 | | | | | | |
| 果形指数 Fruit shape index | -0.058 | -0.050 | 0.018 | 0.005 | -0.207** | 0.211** | -0.161 | 1.000 | | | | | |
| 一年生枝条长度 Length of 1-year-old branch | 0.114 | 0.178* | -0.149 | -0.047 | 0.212** | 0.122 | 0.139 | -0.029 | 1.000 | | | | |
| 一年生枝条节间长度 Internode length of 1-year-old branch | 0.187* | 0.185* | -0.196* | -0.109 | 0.244** | 0.194* | 0.215** | -0.039 | 0.490** | 1.000 | | | |
| 一年生枝条粗度 Diameter of 1-year-old branch | 0.060 | 0.053 | -0.068 | -0.088 | 0.159* | 0.084 | 0.116 | -0.077 | 0.392** | 0.566** | 1.000 | | |
| 叶柄长度 Petiole length | 0.149 | 0.149 | -0.144 | -0.033 | 0.122 | 0.172* | 0.149 | 0.096 | -0.006 | 0.524** | 0.282** | 1.000 | |
| 叶片长度 Leaf length | 0.223** | 0.196* | -0.198* | -0.060 | 0.245** | 0.230** | 0.226** | 0.031 | 0.072 | 0.637** | 0.402** | 0.872** | 1.000 |
| 叶片宽度 Leaf width | 0.177* | 0.202* | -0.210** | -0.081 | 0.232** | 0.178* | 0.183* | 0.009 | 0.113 | 0.634** | 0.447** | 0.836** | 0.920** |

*代表在 0.05 水平上显著相关; **代表在 0.01 水平上显著相关
*Correlation significant at $P<0.05$, **Correlation significant at $P<0.01$

2.4 野苹果种质资源主成分分析

以特征值大于 1.0 为标准提取主成分显示 (表 4), 在 14 个主成分中, 前 5 个累计贡献率达 79.258%, 说明前 5 个主成分基本可以代表原始变量的大部分信息。第 1 主成分的特征值为 4.762, 贡献率最大, 为 34.016%, 作用较大的性状包括果实横径、单果重、果实纵径, 主要反映的是果实性状指标; 第 2 主成分特征值为 2.787, 贡献率为 19.907%, 作用比较大的性状分别为叶片宽度、叶柄长度、叶

片长度, 主要反映的是叶片性状指标; 第 3 主成分特征值为 1.437, 贡献率为 10.263%, 主要性状分别为一年生枝条长度、一年生枝条粗度、果形指数, 主成分反映的是枝条性状指标; 第 4 主成分特征值为 1.096, 贡献率为 7.826%, 主要性状为果形指数、一年生枝条长度、果实纵径, 主要反映的是果实性状和枝条性状; 第 5 主成分特征值为 1.015, 贡献率为 7.247%, 主要性状为果梗长、果梗粗、可溶性固形物含量, 主要反映的是果梗性状指标。

表 4 参试材料各性状的主成分载荷与贡献率

Table 4 Factor loading matrix and contribution rate of traits of the test materials

| 性状 Trait | 因子 1 Factor 1 | 因子 2 Factor 2 | 因子 3 Factor 3 | 因子 4 Factor 4 | 因子 5 Factor 5 |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 单果重 Fruit weight | 0.346 | -0.337 | 0.101 | 0.026 | 0.142 |
| 果梗粗 Stalk diameter | 0.276 | -0.206 | -0.016 | -0.085 | -0.379 |
| 果梗长 Stalk length | -0.180 | 0.032 | 0.080 | 0.142 | 0.778 |
| 可溶性固形物含量 Soluble solids content | -0.167 | 0.176 | 0.010 | -0.101 | -0.286 |
| 果实硬度 Fruit hardness | 0.281 | -0.168 | -0.172 | -0.249 | 0.017 |
| 果实纵径 Fruit length | 0.342 | -0.317 | 0.171 | 0.252 | 0.076 |
| 果实横径 Fruit diameter | 0.356 | -0.331 | 0.036 | -0.041 | 0.161 |
| 果形指数 Fruit shape index | -0.020 | 0.039 | 0.366 | 0.795 | -0.225 |
| 一年生枝条长度 Length of 1-year-old branch | 0.147 | 0.060 | -0.619 | 0.357 | -0.116 |
| 一年生枝节间长度 Internode length of 1-year-old branch | 0.295 | 0.302 | -0.261 | 0.136 | 0.039 |
| 一年生枝条粗度 Diameter of 1-year-old branch | 0.198 | 0.263 | -0.386 | 0.167 | 0.225 |
| 叶柄长度 Petiole length | 0.270 | 0.365 | 0.332 | -0.081 | 0.011 |
| 叶片长度 Leaf length | 0.320 | 0.363 | 0.225 | -0.105 | 0.028 |
| 叶片宽度 Leaf width | 0.312 | 0.379 | 0.169 | -0.107 | 0.014 |
| 特征值 Numerical value | 4.762 | 2.787 | 1.437 | 1.096 | 1.015 |
| 贡献率 (%) Contribution rate | 34.016 | 19.907 | 10.263 | 7.826 | 7.247 |
| 累计贡献率 (%) Total account | 34.016 | 53.923 | 64.186 | 72.011 | 79.258 |

2.5 野苹果种质资源聚类分析

依据 14 个表型性状进行聚类分析, 欧氏距离为 17.5 处可将 160 份野苹果种质资源分成 6 个类群 (图 1)。

第 I 类群包括 35 份种质资源, 其中巩留野苹果资源 9 份, 霍城野苹果资源 10 份, 新源野苹果资源 16 份; 该类群是资源数量最多的类群, 与其他类群相比较, 第 I 类群没有突出的特点。第 II 类群包括 26 份种质资源, 其中巩留野苹果资源 7 份, 霍城野苹果资源 12 份, 新源野苹果资源 7 份; 该类群是平均果实横、纵径最大的类群, 聚集了绝大部分的大果型种质资源。第 III 类群包括 23 份种质资源, 其中巩留野苹果资源 5 份, 霍城野苹果资源 3 份, 新源野

苹果资源 15 份; 该类群材料的主要特点是果梗短粗, 枝条长, 果肉紧实, 果形较圆。第 IV 类群包括 34 份种质资源, 其中巩留野苹果资源 11 份, 霍城野苹果资源 10 份, 新源野苹果资源 13 份; 该类群是一年生枝条平均节间长度、平均叶柄长度、平均叶片长度和平均叶片宽度最大的类群。第 V 类群包括 22 份种质资源, 其中巩留野苹果资源 13 份, 霍城野苹果资源 5 份, 新源野苹果资源 4 份; 该类群类群材料主要特点是可溶性固形物含量高, 小果类型。第 VI 类群包括 20 份种质资源, 其中巩留野苹果资源 15 份, 新源野苹果资源 5 份; 该类群是一年生枝条平均长度、一年生枝条节间平均长度、一年生枝条平均粗度、平均叶柄长度、平均叶片长度和平均叶片宽度最小的类群 (表 5)。

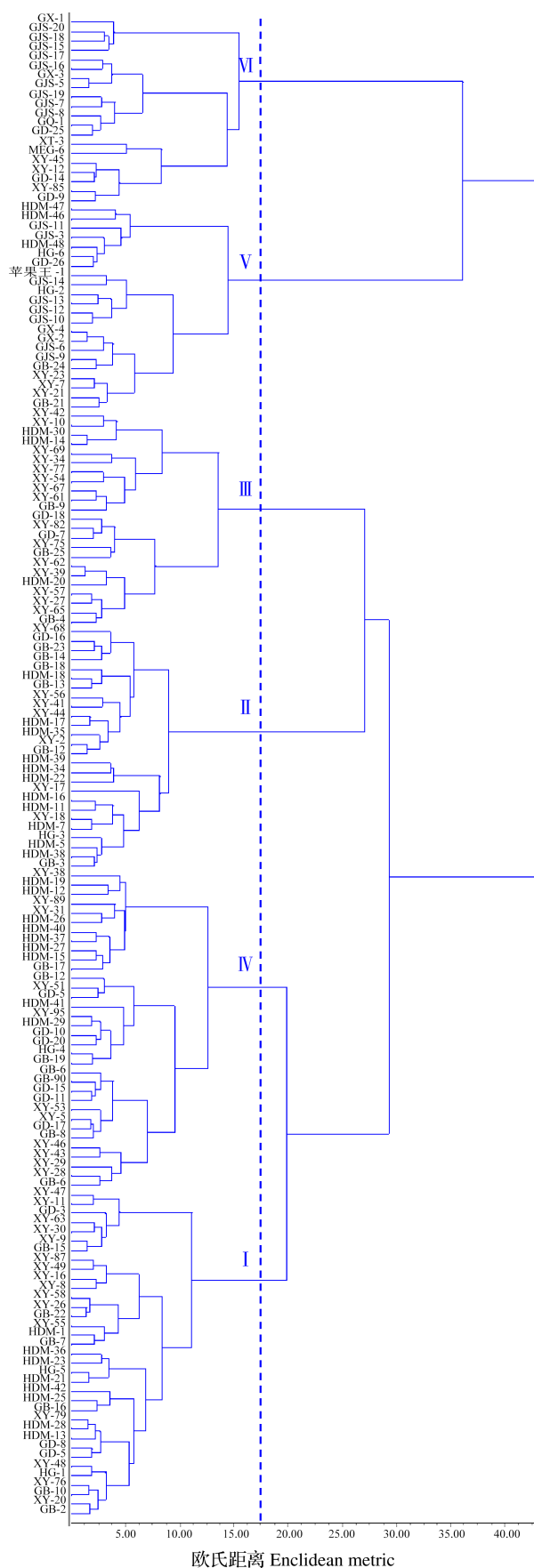


图 1 基于表型数据的聚类分析图

Fig.1 Cluster analysis based on phenotypic traits

3 讨论

表型性状是遗传物质的最终体现,也是育种工作的基础。尽管现代分子生物学手段为种质资源的研究提供了稳定有效的方法,对于表型性状的调查和分析仍不可缺少,尤其是近些年来受苹果小吉丁虫危害及人类活动的影响,新疆野苹果资源的数量和质量均在急剧下降,已被列为国家濒危二级保护植物^[4, 18-19]。因此,开展新疆野苹果的遗传多样性研究和保护工作意义重大^[3]。本研究从 160 份伊犁天山的野苹果种质资源入手,从表型性状的角度进行系统分析,为有效保护和利用新疆野苹果资源提供了依据。

3.1 新疆野苹果种质资源表型性状的差异分析

本研究分析了 160 份野苹果资源的 14 个表型性状,不同表型性状的变异系数依次为:果实硬度(38.44%)、单果重(38.28%)、一年生枝条长度(28.39%)、果梗长(27.17%)、叶柄长度(22.92%)、叶片宽度(21.01%)、叶片长度(20.93%)、一年生枝条粗度(20.31%)、果梗粗(20.28%)、一年生枝条节间长度(19.99%)、果实纵径(14.96%)、果实横径(14.69%)、可溶性固形物含量(11.80%)、果形指数(5.75%)。其中,果实硬度的最小值为 1.50 kg/cm²,最大值为 10.38 kg/cm²,多样性指数为 2.04;单果重的最小值为 5.88 g,最大值为 56.56 g,多样性指数为 2.05,这 2 个表型性状表现出了极其丰富的多样性。变异系数最小的性状为果形指数。另外,果实纵径的多样性指数(2.06)最高,一年生枝条长度及节间长度的多样性指数(1.95)最低,仅从多样性指数来看,各性状差别并不是很大。本研究结果与刁永强等^[2]、闫鹏等^[20]、王宪璞等^[21]、刘遵春等^[22]报道中的新疆野苹果单果重、果实纵径、果实横径、果梗长、果梗粗、叶柄长度、叶片长度、叶片宽度及可溶性固形物含量等形态性状的变异系数基本一致,数值居中,反映出伊犁地区野苹果资源具有丰富的表型多样性。

3.2 新疆野苹果种质资源遗传多样性的综合分析

遗传多样性的评价方法和指标很多,可以从基因型、表型等不同水平进行评价。最近,高源等^[3]、于少帅等^[23]分别利用来自叶绿体和细胞核的分子标记对新疆野苹果进行了遗传多样性分析,认为新疆野苹果存在丰富的遗传多样性。表型性状对植物的遗传多样性进行研究被认为是最为直接、简易的方法^[24],关于新疆野苹果亦有大量报道^[2, 20-22]。本

表 5 6 个类群的表型性状比较
Table 5 Comparison of phenotypic traits of 6 groups

| 表型性状 Phenotypic traits | 第 I 类群 Group I | | | 第 II 类群 Group II | | | 第 III 类群 Group III | | | 第 IV 类群 Group IV | | | 第 V 类群 Group V | | | 第 VI 类群 Group VI | | |
|---|--------------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|-------------------|--|
| | 平均值 \pm 标准差 $\bar{X} \pm SD$ | 变异系数 (%) CV | | 平均值 \pm 标准差 $\bar{X} \pm SD$ | 变异系数 (%) CV | | 平均值 \pm 标准差 $\bar{X} \pm SD$ | 变异系数 (%) CV | | 平均值 \pm 标准差 $\bar{X} \pm SD$ | 变异系数 (%) CV | | 平均值 \pm 标准差 $\bar{X} \pm SD$ | 变异系数 (%) CV | | 平均值 \pm 标准差 $\bar{X} \pm SD$ | 变异系数 (%) CV | |
| 单果重 (g) Fruit weight | 27.81 \pm 4.24b | 15.23 | | 39.13 \pm 6.98a | 17.84 | | 25.09 \pm 4.44bc | 17.69 | | 24.54 \pm 5.51c | 22.45 | | 12.09 \pm 3.22e | 26.65 | | 18.65 \pm 8.71d | 46.72 | |
| 果梗粗 (mm) Stalk diameter | 1.53 \pm 0.20b | 12.98 | | 1.89 \pm 0.32a | 16.92 | | 1.83 \pm 0.31a | 17.20 | | 1.59 \pm 0.27b | 16.91 | | 1.34 \pm 0.23c | 17.29 | | 1.36 \pm 0.20c | 14.97 | |
| 果梗长 (mm) Stalk length | 18.31 \pm 4.10bc | 22.40 | | 17.24 \pm 3.83c | 22.23 | | 13.97 \pm 3.77d | 27.03 | | 18.55 \pm 4.67bc | 25.18 | | 19.75 \pm 4.61b | 23.32 | | 23.49 \pm 5.20a | 22.14 | |
| 可溶性固形物含量 (%) Soluble solids content | 10.91 \pm 0.92de | 8.44 | | 10.55 \pm 1.48e | 14.03 | | 11.57 \pm 0.97abcd | 8.41 | | 11.22 \pm 1.16cd | 10.34 | | 11.96 \pm 1.47ab | 12.30 | | 11.82 \pm 1.63abc | 13.75 | |
| 果实硬度 (kg/cm ²) Fruit hardness | 5.27 \pm 1.51b | 28.75 | | 5.48 \pm 1.20ab | 21.96 | | 6.27 \pm 1.51a | 24.08 | | 5.66 \pm 1.65ab | 29.15 | | 2.76 \pm 1.31c | 47.45 | | 3.27 \pm 1.66c | 50.79 | |
| 果实纵径 (mm) Fruit length | 35.99 \pm 1.82b | 5.07 | | 40.38 \pm 2.57a | 6.38 | | 33.17 \pm 2.90c | 8.74 | | 33.10 \pm 2.60c | 7.86 | | 26.65 \pm 3.11e | 11.65 | | 30.15 \pm 4.80d | 15.93 | |
| 果实横径 (mm) Fruit diameter | 41.81 \pm 2.26b | 5.41 | | 47.05 \pm 2.59a | 5.50 | | 40.31 \pm 2.67b | 6.62 | | 40.20 \pm 3.67b | 9.13 | | 31.01 \pm 3.32d | 10.70 | | 35.63 \pm 6.10c | 17.13 | |
| 果形指数 Fruit shape index | 0.86 \pm 0.04a | 4.38 | | 0.86 \pm 0.05a | 5.54 | | 0.82 \pm 0.04b | 5.26 | | 0.83 \pm 0.04b | 4.40 | | 0.86 \pm 0.07a | 8.28 | | 0.85 \pm 0.04ab | 4.99 | |
| 一年生枝条长度 (cm) Length of 1-year-old branch | 16.42 \pm 2.85d | 17.36 | | 20.22 \pm 3.91bc | 19.32 | | 25.53 \pm 7.01a | 27.45 | | 18.60 \pm 3.99c | 21.43 | | 18.69 \pm 4.79cd | 25.65 | | 14.72 \pm 3.37d | 22.87 | |
| 一年生枝条节间长度 (cm) Internode length of 1-year-old branch | 2.07 \pm 0.27c | 12.99 | | 2.33 \pm 0.27ab | 11.40 | | 2.40 \pm 0.33a | 13.53 | | 2.44 \pm 0.30a | 12.42 | | 2.19 \pm 0.21bc | 9.53 | | 1.43 \pm 0.45d | 31.69 | |
| 一年生枝条粗度 (mm) Diameter of 1-year-old branch | 3.28 \pm 0.59c | 17.88 | | 3.24 \pm 0.36c | 11.24 | | 3.69 \pm 0.70a | 18.85 | | 3.57 \pm 0.53ab | 14.87 | | 3.33 \pm 0.34bc | 10.31 | | 2.43 \pm 0.81d | 33.25 | |
| 叶柄长度 (mm) Petiole length | 22.22 \pm 3.30b | 14.84 | | 22.50 \pm 2.71b | 12.06 | | 19.53 \pm 3.53c | 18.05 | | 26.14 \pm 3.55a | 13.58 | | 23.55 \pm 4.28b | 18.19 | | 14.32 \pm 4.70d | 32.81 | |
| 叶片长度 (mm) Leaf length | 71.24 \pm 8.71b | 12.22 | | 72.85 \pm 7.69b | 10.55 | | 65.8 \pm 9.10c | 13.83 | | 82.23 \pm 8.07a | 9.81 | | 72.43 \pm 10.97b | 15.15 | | 43.36 \pm 13.07d | 30.14 | |
| 叶片宽度 (mm) Leaf width | 41.92 \pm 5.46b | 13.02 | | 43.21 \pm 5.13b | 11.87 | | 40.14 \pm 6.15b | 15.33 | | 48.50 \pm 5.60a | 11.54 | | 42.79 \pm 5.86b | 13.69 | | 26.13 \pm 8.06c | 30.85 | |

不同小写字母代表在 0.05 水平上显著差异

Different lowercase letters indicate the significant at $P < 0.05$

研究与前人研究的最大不同点是,试验材料是在同一批野苹果砧木上嫁接,待生长稳定一致后进行的调查,相比前人在野苹果原生境进行的表型性状统计,性状的稳定性更高,更能表现出不同材料的遗传特性。本研究对来自伊犁的 160 份野苹果资源统计分析发现,隶属函数均值大于 0.6 的有 20 份资源,这些资源在单果重、果实硬度、果实纵径、果实横径等方面有明显优势,隶属函数均值介于 0.2~0.4 之间的有 15 份,其表型性状不具有优势,可以据此筛选野苹果资源。主成分分析法是通过降维的方式,将作物各性状间复杂的关系转化为较少的几个主成分,同时可以排除由于原指标间的相关关系的干扰,而得到广泛应用^[16,25],本研究将 14 个表型指标进行主成分分析,得出前 5 个主成分累计贡献率达 79.258%,其中第 1 主成分与果实性状有关,第 2 主成分与叶片性状有关,第 3 主成分与枝条性状有关,第 4 主成分与果实性状和枝条性状有关,第 5 主成分与果梗性状有关,这些特征是造成伊犁天山野苹果种质表型多样化的主要因素。最后,通过系统聚类法将 160 份种质资源分为 6 个类群,其中第 II 类群的单果重最大,第 III 类群的果实硬度最大,第 V 类群的可溶性固形物含量最大,各类群之间在表型性状上有明显差异。同时,不同类群间也有一定地理分布倾向,例如第 III 类群包括 23 份种质资源,来自新源的野苹果资源有 15 份,占比 65%;第 VI 类群包括 20 份种质资源,其中巩留的野苹果资源有 15 份,占比 75%。说明伊犁 3 个地区的新疆野苹果各自经历着遗传分化但又存在频繁的基因交流^[3]。

本研究仅针对新疆野苹果种质资源的表型性状进行了分析评价,今后还有待于从分子生物学角度进一步对这些资源进行研究,以期更加客观地评价伊犁野苹果种质资源特性,为新疆野苹果种质资源的保护和利用提供帮助。

参考文献

- [1] 王泽华. 不同居群新疆野苹果抗寒性研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017
Wang Z H. Study on cold resistance of *Malus sieversii* in different populations. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017
- [2] 刁永强, 许正, 闫鹏, 陈淑英, 张学超, 刘君. 新疆野苹果资源类型表型性状鉴定及优异资源的初步筛选. 经济林研究, 2019, 37(1): 17-24, 49
Diao Y Q, Xu Z, Yan P, Chen S Y, Zhang X C, Liu J. Phenotypic characteristic identification and preliminary selection of excellent resources in *Malus sieversii* resource types. Non-wood Forest Research, 2019, 37(1): 17-24, 49
- [3] 高源, 王大江, 王昆, 丛佩华, 张彩霞, 李连文, 朴继成. 新疆野苹果叶绿体 DNA 变异与遗传进化分析. 植物遗传资源学报, 2020, 21(3): 579-587
Gao Y, Wang D J, Wang K, Cong P H, Zhang C X, Li L W, Piao J C. Chloroplast DNA variation and genetic evolution of *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(3): 579-587
- [4] 张苹, 吕昭智, 张鑫, 赵想平, 张永光. 新疆伊犁与哈萨克斯坦新疆野苹果 (*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.) 种群年龄结构. 干旱区研究, 2019, 36(4): 844-853
Zhang P, Lv Z Z, Zhang X, Zhao X P, Zhang Y G. Age structure of *Malus sieversii* population in Ili of Xinjiang and Kazakhstan. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 844-853
- [5] Duan N B, Bai Y, Sun H H, Wang N, Ma Y M, Li M J, Wang X, Jiao C, Legall N, Mao L Y, Wan S B, Wang K, He T M, Feng S Q, Zhang Z Y, Mao Z Q, Shen X, Chen X L, Jiang Y M, Wu S J, Yin C M, Ge S F, Yang L, Jiang S H, Xu H F, Liu J X, Wang D Y, Qu C Z, Wang Y C, Zuo W F, Xiang L, Liu C, Zhang D Y, Gao Y, Xu Y M, Xu K N, Chao T, Fazio G, Shu H R, Zhong G Y, Cheng L L, Fei Z J, Chen X S. Genome resequencing reveals the history of apple and supports a two-stage model for fruit enlargement. Nature Communication, 2017, 8(2): 249
- [6] Sun X P, Jiao C, Schwaninger H, Chao C T, Ma Y M, Duan N B, Khan A, Ban S, Xu K N, Cheng L L, Zhong G Y, Fei Z J. Phased diploid genome assemblies and pan-genomes provide insights into the genetic history of apple domestication. Nature Genetics, 2020, 52(12): 1423-1432
- [7] 李杰军, 袁朝. 依托新疆野苹果资源培育特色经济林产业. 内蒙古林业调查设计, 2007, 30(4): 62-63
Li J J, Yuan C. Relying on Xinjiang wild apple resources to cultivate characteristic economic forest industry. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2007, 30(4): 62-63
- [8] 秦伟. 新疆野苹果繁育特性及种质资源亲缘关系的研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010
Qin W. Reproduction characteristics and genetic relationship of germplasm resources for *Malus sieversii*. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010
- [9] 文玉珍, 徐晖, 于玮玮, 杨美玲, 龙涛, 阎国荣. 低温胁迫下新疆野苹果离体叶片生理特性分析. 天津农学院学报, 2014, 21(1): 39-42
Wen Y Z, Xu H, Yu W W, Yang M L, Long H, Yan G R. Physiological analysis of leaves in vitro of *Malus sieversii* under low temperature stress. Journal of Tianjin Agricultural University, 2014, 21(1): 39-42
- [10] 李开花, 刘香, 袁培红, 周龙. 新疆野苹果砧木嫁接亲和性试验研究. 中国园艺文摘, 2015, 31(5): 22-24
Li K H, Liu X, Yuan P H, Zhou L. Study of graft compatibility on *Malus sieversii* Ledeb. rootstocks. China Horticulture Abstracts, 2015, 31(5): 22-24
- [11] 于立洋, 左力辉, 李秀平, 李顺华, 王宇攀, 张军, 杨敏生. 4 个新疆野苹果优系果实品质比较. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 33-40
Yu L Y, Zuo L H, Li X P, Li S H, Wang Y P, Zhang J, Yang M S. Comparison of fruit quality among 4 *Malus sieversii* clones. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 33-40
- [12] 郭仲军, 刘丽艳, 张炜银, 臧润国. 新疆野苹果资源现状分析

- 及前景展望 // 中国生物多样性保护与研究进展. 北京: 气象出版社, 2004: 54-61
- Guo Z J, Liu L Y, Zhang W Y, Zang R G. Review on the resource status and future development of wild *Malus sieversii* in Xinjiang // Advances in biodiversity conservation and research in China. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 54-61
- [13] 郑点, 吴玉霞, 覃伟铭, 何天明. 新疆野苹果作为苹果砧木利用的研究进展. 中国野生植物资源, 2019, 38(2): 56-59, 65
- Zheng D, Wu Y X, Qin W M, He T M. Advance in research on application of *Malus sieversii* as rootstock. Chinese Wild Plant Resources, 2019, 38(2): 56-59, 65
- [14] 王昆, 刘凤之, 曹玉芬. 苹果种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2005
- Wang K, Liu F Z, Cao Y F. Descriptors and data standard for apple (*Malus* spp. Mill.). Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [15] 郝曦煜, 杨涛, 梁杰, 郭文云, 肖焕玉, 王英杰, 马信飞, 刘婷婷, 宗绪晓. 160 份外引鹰嘴豆种质主要农艺性状的遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2020, 21(4): 875-883
- Hao X Y, Yang T, Liang J, Guo W Y, Xiao H Y, Wang Y J, Ma X F, Liu T T, Zong X X. Genetic diversity analysis of major agronomic traits in 160 introduced chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(4): 875-883
- [16] 赵孟良, 王丽慧, 任延靖, 孙雪梅, 侯志强, 杨世鹏, 李莉, 钟启文. 257 份菊芋种质资源表型性状的遗传多样性. 作物学报, 2020, 46(5): 712-725
- Zhao M L, Wang L H, Ren Y J, Sun X M, Hou Z Q, Yang S P, Li L, Zhong Q W. Genetic diversity of phenotypic traits in 257 Jerusalem artichoke accessions. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(5): 712-725
- [17] 吴欣明, 郭璞, 池惠武, 方志红, 石永红, 王运琦, 刘建宁, 王赞, 王学敏. 国外紫花苜蓿种质资源表型性状与品质多样性分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 104-112
- Wu X M, Guo P, Chi H W, Fang Z H, Shi Y H, Wang Y Q, Liu J N, Wang Z, Wang X M. Diversity analysis of phenotypic traits and quality characteristics of alfalfa (*Medicago sativa*) introduced from abroad germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(1): 104-112
- [18] 刘忠权, 陈卫民, 许正, 梁巧玲. 新疆天山西部野苹果林分布与苹果小吉丁虫危害现状研究. 北方园艺, 2014, 38(17): 121-124
- Liu Z Q, Chen W M, Xu Z, Liang Q L. *Malus sieversii* forest distribution and *Agrilus mali* Matsumura status of damage in the west part of Tianshan Mountains. Northern Horticulture, 2014, 38(17): 121-124
- [19] 苏志豪, 李文军, 曹秋梅, 周晓兵, 张元明. 新疆野苹果的种群年龄结构与数量动态. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1153-1160
- Su Z H, Li W J, Cao Q M, Zhou X B, Zhang Y M. Age composition and quantitative dynamic status of *Malus sieversii* population. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1153-1160
- [20] 闫鹏, 韩立群, 梅闯, 刁永强, 许正, 张学超, 马凯, 艾沙江·买买提, 王继勋. 新疆野苹果 (*Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.) 植物学性状遗传多样性及相关性分析. 植物遗传资源学报, 2016, 17(4): 683-689
- Yan P, Han L Q, Mei C, Diao Y Q, Xu Z, Zhang X C, Ma K, Aisajan M, Wang J X. Genetic diversity and correlation analysis of botanical characters in Xinjiang wild apple (*Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.). Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(4): 683-689
- [21] 王宪璞, 吴玉霞, 何天明. 新疆野苹果果实若干性状的遗传多样性分析. 中国野生植物资源, 2016, 35(1): 19-23
- Wang X P, Wu Y X, He T M. Genetic diversity analysis of several fruit traits in *Malus sieversii* (Ldb.) Rome. Chinese Wild Plant Resources, 2016, 35(1): 19-23
- [22] 刘遵春, 苗卫东, 刘大亮, 陈学森. 新疆野苹果性状的遗传变异及相关性分析. 果树学报, 2012, 29(4): 530-535
- Liu Z C, Miao W D, Liu D L, Chen X S. Genetic variation and correlation analysis of main characters in *Malus sieversii* resources. Journal of Fruit Science, 2012, 29(4): 530-535
- [23] 于少帅, 赵文霞, 姚艳霞, 张学超, 淮稳霞. 新疆野苹果和栽培苹果遗传分化与变异特征. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1274-1281
- Yu S S, Zhao W X, Yao Y X, Zhang X C, Huai W X. Genetic differentiation and variation characteristics of *Malus sieversii* and cultivated apples. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(5): 1274-1281
- [24] 胡标林, 万勇, 李霞, 雷建国, 罗向东, 严文贵, 谢建坤. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价. 作物学报, 2012, 38(5): 829-839
- Hu B L, Wan Y, Li X, Lei J G, Luo X D, Yan W G, Xie J K. Analysis on genetic diversity of phenotypic traits in rice (*Oryza sativa*) core collection and its comprehensive assessment. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(5): 829-839
- [25] 董胜君, 孙永强, 陈建华, 卢彩云, 刘权钢, 刘立新. 野杏无性系表型性状多样性分析及综合评价. 植物遗传资源学报, 2020, 21(5): 1156-1166
- Dong S J, Sun Y Q, Chen J H, Lu C Y, Liu Q G, Liu L X. Phenotypic traits diversity analysis and comprehensive evaluation of *Armeniaca vulgaris* var. *ansu* clones. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(5): 1156-1166

附表 1 160 份野苹果种质资源的隶属函数

Table S 1 Membership function of 160 wild apple germplasm resources

| 编号 Number | 名称 Name | 单果重 Fruit weight | 果梗粗 Stalk diameter | 果梗长 Stalk length | 可溶性 固形物 含量 Soluble solids content | 果实硬 度 Fruit hardness | 果实纵 径 Fruit length | 果实横 径 Fruit diameter | 果形指 数 Fruit shape index | 一年生枝 条长度 Length of 1-year-old branch | 一年生枝 节间长度 Internode length of 1-year-old branch | 一年生枝 条粗度 Diameter of 1-year-old branch | 叶柄长度 Petiole length | 叶片长 度 Leaf length | 叶片宽 度 Leaf width | 隶属函数均值 Mean of membership function |
|--------------|------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--|----------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|--|---|--|------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 1 | GB-2 | 0.420 | 0.483 | 0.358 | 0.403 | 0.383 | 0.645 | 0.584 | 0.662 | 0.152 | 0.484 | 0.576 | 0.818 | 0.689 | 0.715 | 0.527 |
| 2 | GB-3 | 0.561 | 0.642 | 0.193 | 0.230 | 0.499 | 0.692 | 0.783 | 0.396 | 0.187 | 0.597 | 0.500 | 0.761 | 0.772 | 0.757 | 0.541 |
| 3 | GB-4 | 0.495 | 0.523 | 0.287 | 0.560 | 0.602 | 0.611 | 0.681 | 0.415 | 0.465 | 0.851 | 0.449 | 0.531 | 0.557 | 0.493 | 0.537 |
| 4 | GB-5 | 0.396 | 0.252 | 0.513 | 0.533 | 0.540 | 0.580 | 0.544 | 0.607 | 0.199 | 0.616 | 0.505 | 0.784 | 0.551 | 0.630 | 0.518 |
| 5 | GB-6 | 0.305 | 0.410 | 0.576 | 0.401 | 0.669 | 0.344 | 0.461 | 0.262 | 0.425 | 0.817 | 0.510 | 0.671 | 0.666 | 0.726 | 0.517 |
| 6 | GB-7 | 0.356 | 0.577 | 0.261 | 0.701 | 0.540 | 0.577 | 0.504 | 0.684 | 0.177 | 0.561 | 0.444 | 0.652 | 0.705 | 0.777 | 0.537 |
| 7 | GB-8 | 0.320 | 0.464 | 0.458 | 0.416 | 0.379 | 0.394 | 0.459 | 0.377 | 0.277 | 0.853 | 0.564 | 0.922 | 0.751 | 0.712 | 0.525 |
| 8 | GB-9 | 0.474 | 0.802 | 0.278 | 0.407 | 0.548 | 0.525 | 0.588 | 0.410 | 0.667 | 0.736 | 0.868 | 0.562 | 0.479 | 0.722 | 0.576 |
| 9 | GB-10 | 0.431 | 0.486 | 0.403 | 0.560 | 0.363 | 0.605 | 0.609 | 0.531 | 0.174 | 0.735 | 0.603 | 0.666 | 0.731 | 0.603 | 0.536 |
| 10 | GB-12 | 0.557 | 0.550 | 0.548 | 0.262 | 0.354 | 0.670 | 0.693 | 0.505 | 0.305 | 0.659 | 0.542 | 0.747 | 0.657 | 0.678 | 0.552 |
| 11 | GB-13 | 0.643 | 0.591 | 0.567 | 0.534 | 0.417 | 0.710 | 0.780 | 0.433 | 0.624 | 0.762 | 0.561 | 0.558 | 0.592 | 0.722 | 0.607 |
| 12 | GB-14 | 0.615 | 0.623 | 0.347 | 0.533 | 0.548 | 0.779 | 0.736 | 0.633 | 0.560 | 0.925 | 0.571 | 0.729 | 0.752 | 0.830 | 0.656 |
| 13 | GB-15 | 0.316 | 0.351 | 0.323 | 0.401 | 0.215 | 0.507 | 0.490 | 0.562 | 0.368 | 0.719 | 0.569 | 0.657 | 0.660 | 0.667 | 0.486 |
| 14 | GB-16 | 0.532 | 0.434 | 0.569 | 0.420 | 0.360 | 0.519 | 0.584 | 0.404 | 0.148 | 0.863 | 0.337 | 0.739 | 0.658 | 0.683 | 0.518 |
| 15 | GB-17 | 0.463 | 0.671 | 0.263 | 0.391 | 0.545 | 0.574 | 0.639 | 0.416 | 0.019 | 0.772 | 0.454 | 0.958 | 0.868 | 0.855 | 0.564 |
| 16 | GB-18 | 0.527 | 0.348 | 0.387 | 0.576 | 0.339 | 0.653 | 0.747 | 0.383 | 0.445 | 0.996 | 0.586 | 0.708 | 0.572 | 0.610 | 0.563 |
| 17 | GB-19 | 0.319 | 0.521 | 0.390 | 0.811 | 0.188 | 0.383 | 0.387 | 0.499 | 0.220 | 0.891 | 0.515 | 0.770 | 0.753 | 0.872 | 0.537 |
| 18 | GB-20 | 0.251 | 0.389 | 0.325 | 0.755 | 0.711 | 0.344 | 0.391 | 0.401 | 0.130 | 0.716 | 0.515 | 0.849 | 0.770 | 0.814 | 0.526 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 19 | GB-21 | 0.147 | 0.417 | 0.467 | 0.566 | 0.387 | 0.206 | 0.227 | 0.424 | 0.043 | 0.634 | 0.527 | 0.655 | 0.537 | 0.621 | 0.418 |
| 20 | GB-22 | 0.514 | 0.416 | 0.236 | 0.627 | 0.537 | 0.636 | 0.663 | 0.494 | 0.209 | 0.786 | 0.533 | 0.814 | 0.720 | 0.763 | 0.568 |
| 21 | GB-23 | 0.470 | 0.615 | 0.366 | 0.369 | 0.488 | 0.775 | 0.653 | 0.782 | 0.237 | 0.772 | 0.548 | 0.786 | 0.696 | 0.753 | 0.593 |
| 22 | GB-24 | 0.089 | 0.174 | 0.601 | 0.492 | 0.082 | 0.168 | 0.169 | 0.465 | 0.283 | 0.688 | 0.485 | 0.692 | 0.626 | 0.627 | 0.403 |
| 23 | GB-25 | 0.468 | 0.662 | 0.249 | 0.302 | 1.000 | 0.490 | 0.608 | 0.303 | 0.280 | 0.676 | 0.466 | 0.656 | 0.604 | 0.633 | 0.528 |
| 24 | GD-3 | 0.355 | 0.352 | 0.543 | 0.143 | 0.184 | 0.510 | 0.544 | 0.461 | 0.168 | 0.614 | 0.681 | 0.759 | 0.491 | 0.521 | 0.452 |
| 25 | GD-5 | 0.270 | 0.422 | 0.453 | 0.660 | 0.233 | 0.524 | 0.416 | 0.761 | 0.121 | 0.614 | 0.525 | 0.968 | 0.903 | 0.961 | 0.559 |
| 26 | GD-7 | 0.328 | 0.486 | 0.145 | 0.541 | 0.507 | 0.364 | 0.482 | 0.267 | 0.108 | 0.611 | 0.539 | 0.774 | 0.665 | 0.717 | 0.467 |
| 27 | GD-8 | 0.333 | 0.282 | 0.677 | 0.487 | 0.375 | 0.482 | 0.523 | 0.443 | 0.193 | 0.655 | 0.513 | 0.819 | 0.659 | 0.710 | 0.511 |
| 28 | GD-9 | 0.377 | 0.363 | 0.794 | 0.502 | 0.490 | 0.507 | 0.552 | 0.440 | 0.143 | 0.325 | 0.248 | 0.564 | 0.446 | 0.433 | 0.442 |
| 29 | GD-10 | 0.312 | 0.351 | 0.554 | 0.744 | 0.471 | 0.478 | 0.487 | 0.506 | 0.254 | 0.822 | 0.561 | 0.842 | 0.670 | 0.780 | 0.559 |
| 30 | GD-11 | 0.242 | 0.301 | 0.454 | 0.457 | 0.500 | 0.431 | 0.425 | 0.528 | 0.222 | 0.697 | 0.720 | 0.873 | 0.793 | 0.920 | 0.540 |
| 31 | GD-12 | 0.310 | 0.416 | 0.221 | 0.452 | 0.202 | 0.456 | 0.456 | 0.520 | 0.188 | 0.905 | 0.542 | 1.138 | 0.985 | 0.923 | 0.551 |
| 32 | GD-14 | 0.275 | 0.320 | 0.627 | 0.311 | 0.317 | 0.446 | 0.463 | 0.483 | 0.121 | 0.531 | 0.439 | 0.413 | 0.359 | 0.365 | 0.391 |
| 33 | GD-15 | 0.399 | 0.368 | 0.327 | 0.374 | 0.418 | 0.549 | 0.588 | 0.458 | 0.263 | 0.822 | 0.678 | 0.873 | 0.801 | 0.858 | 0.555 |
| 34 | GD-16 | 0.697 | 0.684 | 0.247 | 0.330 | 0.380 | 0.888 | 0.852 | 0.627 | 0.237 | 0.772 | 0.548 | 0.786 | 0.696 | 0.753 | 0.607 |
| 35 | GD-17 | 0.357 | 0.518 | 0.452 | 0.303 | 0.396 | 0.478 | 0.574 | 0.339 | 0.115 | 0.738 | 0.644 | 0.852 | 0.769 | 0.866 | 0.529 |
| 36 | GD-18 | 0.307 | 0.607 | 0.000 | 0.518 | 0.301 | 0.366 | 0.471 | 0.292 | 0.374 | 0.717 | 0.625 | 0.712 | 0.645 | 0.737 | 0.477 |
| 37 | GD-25 | 0.141 | 0.219 | 0.639 | 0.580 | 0.075 | 0.229 | 0.204 | 0.542 | 0.080 | 0.531 | 0.544 | 0.622 | 0.387 | 0.434 | 0.373 |
| 38 | GD-26 | 0.153 | 0.342 | 0.401 | 0.533 | 0.077 | 0.349 | 0.242 | 0.767 | 0.428 | 0.655 | 0.612 | 0.740 | 0.666 | 0.634 | 0.471 |
| 39 | GJS-3 | 0.170 | 0.260 | 0.618 | 0.585 | 0.082 | 0.437 | 0.246 | 0.987 | 0.198 | 0.651 | 0.626 | 0.795 | 0.635 | 0.638 | 0.495 |
| 40 | GJS-5 | 0.063 | 0.306 | 0.467 | 0.863 | 0.098 | 0.127 | 0.085 | 0.576 | 0.168 | 0.387 | 0.424 | 0.550 | 0.400 | 0.430 | 0.353 |
| 41 | GJS-6 | 0.000 | 0.329 | 0.795 | 0.764 | 0.065 | 0.000 | 0.032 | 0.329 | 0.177 | 0.518 | 0.493 | 0.711 | 0.563 | 0.554 | 0.381 |
| 42 | GJS-7 | 0.269 | 0.322 | 0.911 | 0.687 | 0.058 | 0.424 | 0.419 | 0.528 | 0.245 | 0.564 | 0.602 | 0.702 | 0.548 | 0.589 | 0.491 |
| 43 | GJS-8 | 0.287 | 0.417 | 0.580 | 0.619 | 0.056 | 0.468 | 0.358 | 0.767 | 0.151 | 0.396 | 0.386 | 0.575 | 0.432 | 0.446 | 0.424 |
| 44 | GJS-9 | 0.060 | 0.236 | 0.379 | 0.358 | 0.068 | 0.138 | 0.102 | 0.560 | 0.133 | 0.533 | 0.520 | 0.671 | 0.502 | 0.510 | 0.341 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 45 | GJS-10 | 0.121 | 0.244 | 0.476 | 0.681 | 0.056 | 0.193 | 0.197 | 0.463 | 0.187 | 0.697 | 0.671 | 0.905 | 0.739 | 0.687 | 0.451 |
| 46 | GJS-11 | 0.110 | 0.225 | 0.910 | 0.571 | 0.071 | 0.232 | 0.179 | 0.616 | 0.511 | 0.614 | 0.749 | 0.789 | 0.682 | 0.783 | 0.503 |
| 47 | GJS-12 | 0.119 | 0.196 | 0.505 | 0.933 | 0.053 | 0.283 | 0.296 | 0.462 | 0.344 | 0.697 | 0.651 | 0.880 | 0.754 | 0.786 | 0.497 |
| 48 | GJS-13 | 0.017 | 0.293 | 0.334 | 0.966 | 0.049 | 0.001 | 0.000 | 0.424 | 0.277 | 0.601 | 0.608 | 0.775 | 0.751 | 0.781 | 0.420 |
| 49 | GJS-14 | 0.071 | 0.313 | 0.556 | 0.824 | 0.062 | 0.100 | 0.075 | 0.521 | 0.029 | 0.593 | 0.415 | 0.958 | 0.925 | 0.871 | 0.451 |
| 50 | GJS-15 | 0.130 | 0.275 | 0.316 | 0.902 | 0.111 | 0.174 | 0.231 | 0.330 | 0.155 | 0.004 | 0.000 | 0.206 | 0.000 | 0.000 | 0.202 |
| 51 | GJS-16 | 0.065 | 0.278 | 0.711 | 0.422 | 0.062 | 0.182 | 0.102 | 0.692 | 0.068 | 0.378 | 0.328 | 0.530 | 0.414 | 0.428 | 0.333 |
| 52 | GJS-17 | 0.050 | 0.248 | 0.434 | 0.469 | 0.087 | 0.043 | 0.045 | 0.430 | 0.146 | 0.295 | 0.318 | 0.460 | 0.228 | 0.246 | 0.250 |
| 53 | GJS-18 | 0.184 | 0.337 | 0.614 | 0.589 | 0.069 | 0.317 | 0.243 | 0.679 | 0.093 | 0.045 | 0.023 | 0.245 | 0.093 | 0.067 | 0.257 |
| 54 | GJS-19 | 0.202 | 0.263 | 1.000 | 1.000 | 0.115 | 0.359 | 0.293 | 0.660 | 0.064 | 0.558 | 0.555 | 0.598 | 0.412 | 0.440 | 0.466 |
| 55 | GJS-20 | 0.101 | 0.319 | 0.850 | 0.953 | 0.109 | 0.164 | 0.174 | 0.441 | 0.094 | 0.045 | 0.023 | 0.245 | 0.093 | 0.067 | 0.263 |
| 56 | GQ-1 | 0.236 | 0.322 | 0.671 | 0.602 | 0.000 | 0.445 | 0.456 | 0.497 | 0.077 | 0.501 | 0.499 | 0.618 | 0.425 | 0.441 | 0.414 |
| 57 | GX-1 | 0.244 | 0.386 | 0.594 | 0.576 | 0.000 | 0.319 | 0.454 | 0.220 | 0.000 | 0.159 | 0.156 | 0.347 | 0.195 | 0.188 | 0.274 |
| 58 | GX-2 | 0.140 | 0.241 | 0.606 | 0.803 | 0.066 | 0.226 | 0.256 | 0.409 | 0.146 | 0.576 | 0.558 | 0.701 | 0.536 | 0.544 | 0.415 |
| 59 | GX-3 | 0.120 | 0.318 | 0.463 | 0.786 | 0.091 | 0.297 | 0.212 | 0.706 | 0.110 | 0.332 | 0.349 | 0.499 | 0.347 | 0.362 | 0.357 |
| 60 | GX-4 | 0.153 | 0.256 | 0.389 | 0.722 | 0.048 | 0.217 | 0.276 | 0.339 | 0.175 | 0.521 | 0.501 | 0.694 | 0.543 | 0.546 | 0.384 |
| 61 | HDM-1 | 0.475 | 0.599 | 0.266 | 0.651 | 0.401 | 0.607 | 0.641 | 0.477 | 0.181 | 0.546 | 0.364 | 0.751 | 0.697 | 0.606 | 0.519 |
| 62 | HDM-5 | 0.607 | 0.717 | 0.175 | 0.574 | 0.578 | 0.690 | 0.795 | 0.373 | 0.279 | 0.656 | 0.439 | 0.795 | 0.705 | 0.765 | 0.582 |
| 63 | HDM-7 | 0.720 | 0.894 | 0.511 | 0.623 | 0.507 | 0.861 | 0.861 | 0.565 | 0.351 | 0.625 | 0.473 | 0.853 | 0.755 | 0.696 | 0.664 |
| 64 | HDM-11 | 0.584 | 0.638 | 0.241 | 0.425 | 0.370 | 0.736 | 0.758 | 0.515 | 0.390 | 0.630 | 0.366 | 0.692 | 0.619 | 0.526 | 0.535 |
| 65 | HDM-12 | 0.440 | 0.561 | 0.646 | 0.820 | 0.409 | 0.577 | 0.621 | 0.454 | 0.362 | 0.519 | 0.695 | 1.004 | 0.849 | 0.846 | 0.629 |
| 66 | HDM-13 | 0.293 | 0.487 | 0.682 | 0.445 | 0.502 | 0.479 | 0.461 | 0.561 | 0.376 | 0.500 | 0.539 | 0.809 | 0.678 | 0.627 | 0.531 |
| 67 | HDM-14 | 0.345 | 0.446 | 0.349 | 0.497 | 0.560 | 0.493 | 0.536 | 0.440 | 0.782 | 0.967 | 0.578 | 0.886 | 0.717 | 0.830 | 0.602 |
| 68 | HDM-15 | 0.467 | 0.553 | 0.188 | 0.543 | 0.319 | 0.609 | 0.672 | 0.426 | 0.355 | 0.988 | 0.454 | 1.028 | 0.794 | 0.657 | 0.575 |
| 69 | HDM-16 | 0.726 | 0.584 | 0.336 | 0.683 | 0.501 | 0.839 | 0.812 | 0.609 | 0.389 | 0.564 | 0.342 | 0.815 | 0.665 | 0.544 | 0.601 |
| 70 | HDM-17 | 0.550 | 0.603 | 0.332 | 0.276 | 0.501 | 0.685 | 0.655 | 0.604 | 0.450 | 0.741 | 0.525 | 0.714 | 0.569 | 0.632 | 0.560 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 71 | HDM-18 | 0.575 | 0.588 | 0.498 | 0.549 | 0.261 | 0.687 | 0.750 | 0.440 | 0.539 | 0.827 | 0.488 | 0.778 | 0.643 | 0.614 | 0.588 |
| 72 | HDM-19 | 0.510 | 0.450 | 0.278 | 0.675 | 0.431 | 0.615 | 0.722 | 0.353 | 0.656 | 0.759 | 0.725 | 1.109 | 0.728 | 0.821 | 0.631 |
| 73 | HDM-20 | 0.364 | 0.598 | 0.120 | 0.665 | 0.332 | 0.571 | 0.524 | 0.630 | 0.681 | 0.607 | 0.556 | 0.663 | 0.609 | 0.562 | 0.534 |
| 74 | HDM-21 | 0.435 | 0.546 | 0.381 | 0.513 | 0.274 | 0.707 | 0.545 | 0.869 | 0.128 | 0.650 | 0.310 | 0.825 | 0.712 | 0.781 | 0.548 |
| 75 | HDM-22 | 0.750 | 0.646 | 0.442 | 0.497 | 0.694 | 1.000 | 0.784 | 0.945 | 0.224 | 0.631 | 0.439 | 0.687 | 0.664 | 0.531 | 0.638 |
| 76 | HDM-23 | 0.400 | 0.319 | 0.574 | 0.378 | 0.272 | 0.603 | 0.511 | 0.723 | 0.319 | 0.679 | 0.327 | 0.729 | 0.788 | 0.625 | 0.518 |
| 77 | HDM-25 | 0.430 | 0.467 | 0.769 | 0.574 | 0.247 | 0.565 | 0.576 | 0.513 | 0.234 | 0.722 | 0.403 | 0.842 | 0.833 | 0.782 | 0.568 |
| 78 | HDM-26 | 0.504 | 0.523 | 0.497 | 0.618 | 0.670 | 0.593 | 0.685 | 0.372 | 0.202 | 0.577 | 0.364 | 0.844 | 0.847 | 0.612 | 0.565 |
| 79 | HDM-27 | 0.505 | 0.574 | 0.401 | 0.506 | 0.447 | 0.602 | 0.705 | 0.357 | 0.348 | 0.765 | 0.564 | 0.904 | 0.787 | 0.791 | 0.590 |
| 80 | HDM-28 | 0.462 | 0.354 | 0.541 | 0.447 | 0.564 | 0.618 | 0.633 | 0.513 | 0.408 | 0.475 | 0.417 | 0.805 | 0.690 | 0.600 | 0.538 |
| 81 | HDM-29 | 0.281 | 0.410 | 0.316 | 0.524 | 0.556 | 0.400 | 0.414 | 0.480 | 0.298 | 0.635 | 0.437 | 0.849 | 0.789 | 0.696 | 0.506 |
| 82 | HDM-30 | 0.421 | 0.568 | 0.239 | 0.420 | 0.512 | 0.567 | 0.619 | 0.438 | 0.805 | 0.927 | 0.566 | 0.819 | 0.797 | 0.884 | 0.613 |
| 83 | HDM-34 | 1.000 | 0.463 | 0.618 | 0.651 | 0.476 | 0.966 | 1.000 | 0.522 | 0.298 | 0.649 | 0.483 | 0.836 | 0.719 | 0.760 | 0.674 |
| 84 | HDM-35 | 0.758 | 0.522 | 0.436 | 0.173 | 0.513 | 0.754 | 0.836 | 0.419 | 0.376 | 0.756 | 0.466 | 0.719 | 0.826 | 0.811 | 0.597 |
| 85 | HDM-36 | 0.363 | 0.309 | 0.215 | 0.418 | 0.146 | 0.619 | 0.542 | 0.693 | 0.163 | 0.561 | 0.366 | 0.829 | 0.571 | 0.724 | 0.466 |
| 86 | HDM-37 | 0.459 | 0.473 | 0.449 | 0.587 | 0.745 | 0.650 | 0.618 | 0.602 | 0.298 | 0.743 | 0.552 | 0.884 | 0.798 | 0.923 | 0.627 |
| 87 | HDM-38 | 0.625 | 0.458 | 0.086 | 0.411 | 0.397 | 0.746 | 0.789 | 0.481 | 0.284 | 0.677 | 0.467 | 0.818 | 0.729 | 0.806 | 0.555 |
| 88 | HDM-39 | 0.764 | 0.324 | 0.556 | 0.851 | 0.639 | 0.891 | 0.739 | 0.832 | 0.324 | 0.876 | 0.439 | 0.806 | 0.759 | 0.555 | 0.668 |
| 89 | HDM-40 | 0.466 | 0.545 | 0.283 | 0.541 | 0.634 | 0.614 | 0.623 | 0.525 | 0.545 | 0.722 | 0.386 | 0.970 | 0.899 | 0.833 | 0.613 |
| 90 | HDM-41 | 0.259 | 0.000 | 0.206 | 0.484 | 0.628 | 0.344 | 0.337 | 0.520 | 0.444 | 0.742 | 0.488 | 0.806 | 0.783 | 0.788 | 0.488 |
| 91 | HDM-42 | 0.584 | 0.270 | 0.400 | 0.613 | 0.330 | 0.618 | 0.743 | 0.324 | 0.008 | 0.726 | 0.342 | 0.946 | 0.927 | 0.798 | 0.545 |
| 92 | HDM-46 | 0.170 | 0.535 | 0.401 | 0.203 | 0.109 | 0.418 | 0.269 | 0.875 | 0.504 | 0.679 | 0.474 | 0.886 | 0.491 | 0.492 | 0.465 |
| 93 | HDM-47 | 0.135 | 0.566 | 0.148 | 0.499 | 0.116 | 0.376 | 0.186 | 0.999 | 0.467 | 0.737 | 0.495 | 1.201 | 0.848 | 0.812 | 0.542 |
| 94 | HDM-48 | 0.103 | 0.379 | 0.438 | 0.345 | 0.148 | 0.256 | 0.119 | 0.861 | 0.493 | 0.777 | 0.505 | 0.791 | 0.780 | 0.818 | 0.487 |
| 95 | HG-1 | 0.564 | 0.339 | 0.571 | 0.448 | 0.391 | 0.714 | 0.685 | 0.603 | 0.159 | 0.655 | 0.587 | 0.745 | 0.672 | 0.720 | 0.561 |
| 96 | HG-2 | 0.017 | 0.480 | 0.355 | 0.814 | 0.029 | 0.065 | 0.018 | 0.579 | 0.493 | 0.777 | 0.505 | 0.791 | 0.780 | 0.818 | 0.466 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 97 | HG-3 | 0.663 | 0.499 | 0.265 | 0.482 | 0.094 | 0.622 | 0.727 | 0.358 | 0.279 | 0.656 | 0.439 | 0.795 | 0.705 | 0.765 | 0.525 |
| 98 | HG-4 | 0.209 | 0.410 | 0.308 | 0.662 | 0.096 | 0.299 | 0.301 | 0.491 | 0.279 | 0.687 | 0.461 | 0.811 | 0.732 | 0.819 | 0.469 |
| 99 | HG-5 | 0.438 | 0.572 | 0.304 | 0.606 | 0.105 | 0.678 | 0.545 | 0.810 | 0.248 | 0.660 | 0.462 | 0.844 | 0.699 | 0.817 | 0.556 |
| 100 | HG-6 | 0.097 | 0.391 | 0.355 | 0.683 | 0.008 | 0.273 | 0.139 | 0.851 | 0.302 | 0.765 | 0.486 | 0.836 | 0.762 | 0.761 | 0.479 |
| 101 | MEG-6 | 0.730 | 0.680 | 0.320 | 0.502 | 0.515 | 0.751 | 0.857 | 0.382 | 0.057 | 0.382 | 0.181 | 0.610 | 0.408 | 0.357 | 0.481 |
| 102 | XY-2 | 0.517 | 0.532 | 0.341 | 0.346 | 0.450 | 0.674 | 0.731 | 0.448 | 0.319 | 0.703 | 0.592 | 0.761 | 0.659 | 0.698 | 0.555 |
| 103 | XY-3 | 0.565 | 0.359 | 0.403 | 0.443 | 0.401 | 0.737 | 0.766 | 0.502 | 0.243 | 0.000 | 0.029 | 0.201 | 0.056 | 0.047 | 0.340 |
| 104 | XY-5 | 0.321 | 0.482 | 0.545 | 0.334 | 0.237 | 0.429 | 0.465 | 0.444 | 0.253 | 0.651 | 0.749 | 0.800 | 0.787 | 0.770 | 0.519 |
| 105 | XY-6 | 0.343 | 0.352 | 0.172 | 0.284 | 0.611 | 0.559 | 0.505 | 0.642 | 0.265 | 0.676 | 0.706 | 0.804 | 0.809 | 0.818 | 0.539 |
| 106 | XY-7 | 0.217 | 0.248 | 0.293 | 0.610 | 0.289 | 0.312 | 0.389 | 0.331 | 0.562 | 0.753 | 0.562 | 0.753 | 0.628 | 0.610 | 0.468 |
| 107 | XY-8 | 0.501 | 0.360 | 0.500 | 0.490 | 0.823 | 0.657 | 0.608 | 0.638 | 0.185 | 0.484 | 0.588 | 0.663 | 0.580 | 0.575 | 0.547 |
| 108 | XY-9 | 0.361 | 0.447 | 0.313 | 0.439 | 0.254 | 0.595 | 0.600 | 0.529 | 0.335 | 0.683 | 0.717 | 0.621 | 0.682 | 0.579 | 0.511 |
| 109 | XY-10 | 0.529 | 0.378 | 0.586 | 0.664 | 0.492 | 0.685 | 0.653 | 0.606 | 0.848 | 0.929 | 0.751 | 0.799 | 0.692 | 0.682 | 0.664 |
| 110 | XY-11 | 0.589 | 0.488 | 0.467 | 0.347 | 0.346 | 0.674 | 0.731 | 0.447 | 0.321 | 0.533 | 0.839 | 0.459 | 0.502 | 0.405 | 0.511 |
| 111 | XY-12 | 0.277 | 0.319 | 0.697 | 0.349 | 0.550 | 0.431 | 0.432 | 0.514 | 0.369 | 0.461 | 0.573 | 0.529 | 0.415 | 0.422 | 0.453 |
| 112 | XY-16 | 0.465 | 0.536 | 0.484 | 0.475 | 0.697 | 0.551 | 0.608 | 0.425 | 0.149 | 0.355 | 0.476 | 0.765 | 0.522 | 0.536 | 0.503 |
| 113 | XY-17 | 0.945 | 1.000 | 0.555 | 0.212 | 0.664 | 0.845 | 0.921 | 0.445 | 0.080 | 0.588 | 0.464 | 0.898 | 0.883 | 0.938 | 0.674 |
| 114 | XY-18 | 0.717 | 0.735 | 0.468 | 0.574 | 0.462 | 0.725 | 0.796 | 0.432 | 0.215 | 0.665 | 0.527 | 0.935 | 0.697 | 0.737 | 0.620 |
| 115 | XY-20 | 0.417 | 0.389 | 0.369 | 0.586 | 0.469 | 0.678 | 0.580 | 0.736 | 0.237 | 0.586 | 0.690 | 0.832 | 0.698 | 0.655 | 0.566 |
| 116 | XY-21 | 0.178 | 0.310 | 0.428 | 0.515 | 0.267 | 0.225 | 0.378 | 0.149 | 0.279 | 0.548 | 0.500 | 0.575 | 0.546 | 0.573 | 0.391 |
| 117 | XY-23 | 0.248 | 0.374 | 0.415 | 0.557 | 0.449 | 0.361 | 0.427 | 0.366 | 0.412 | 0.758 | 0.481 | 0.546 | 0.596 | 0.605 | 0.471 |
| 118 | XY-26 | 0.536 | 0.456 | 0.287 | 0.517 | 0.629 | 0.661 | 0.697 | 0.483 | 0.311 | 0.689 | 0.549 | 0.723 | 0.656 | 0.784 | 0.570 |
| 119 | XY-27 | 0.402 | 0.448 | 0.314 | 0.559 | 0.555 | 0.496 | 0.567 | 0.388 | 0.265 | 0.625 | 0.527 | 0.660 | 0.608 | 0.558 | 0.498 |
| 120 | XY-28 | 0.226 | 0.594 | 0.576 | 0.415 | 0.706 | 0.359 | 0.350 | 0.526 | 0.297 | 1.000 | 0.486 | 0.808 | 0.661 | 0.647 | 0.546 |
| 121 | XY-29 | 0.272 | 0.375 | 0.860 | 0.601 | 0.528 | 0.330 | 0.458 | 0.236 | 0.457 | 0.728 | 0.612 | 0.841 | 0.765 | 0.955 | 0.573 |
| 122 | XY-30 | 0.438 | 0.266 | 0.442 | 0.524 | 0.217 | 0.577 | 0.642 | 0.416 | 0.257 | 0.460 | 0.744 | 0.737 | 0.601 | 0.631 | 0.497 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 123 | XY-31 | 0.570 | 0.489 | 0.571 | 0.450 | 0.626 | 0.580 | 0.772 | 0.211 | 0.219 | 0.647 | 0.656 | 0.841 | 0.637 | 0.518 | 0.556 |
| 124 | XY-34 | 0.372 | 0.429 | 0.330 | 0.541 | 0.518 | 0.512 | 0.550 | 0.455 | 1.000 | 0.840 | 0.417 | 0.469 | 0.412 | 0.382 | 0.516 |
| 125 | XY-38 | 0.626 | 0.478 | 0.652 | 0.379 | 0.788 | 0.593 | 0.798 | 0.195 | 0.492 | 0.887 | 0.612 | 1.000 | 0.933 | 1.000 | 0.674 |
| 126 | XY-39 | 0.378 | 0.841 | 0.249 | 0.698 | 0.399 | 0.499 | 0.532 | 0.462 | 0.536 | 0.640 | 0.561 | 0.600 | 0.531 | 0.541 | 0.533 |
| 127 | XY-41 | 0.730 | 0.488 | 0.410 | 0.000 | 0.360 | 0.804 | 0.784 | 0.593 | 0.536 | 0.687 | 0.703 | 0.644 | 0.688 | 0.613 | 0.574 |
| 128 | XY-42 | 0.449 | 0.473 | 0.254 | 0.675 | 0.452 | 0.595 | 0.619 | 0.492 | 0.915 | 0.881 | 1.000 | 0.803 | 0.808 | 0.847 | 0.662 |
| 129 | XY-43 | 0.403 | 0.349 | 0.651 | 0.397 | 0.365 | 0.522 | 0.577 | 0.424 | 0.564 | 0.956 | 0.761 | 0.600 | 0.645 | 0.621 | 0.560 |
| 130 | XY-44 | 0.424 | 0.541 | 0.452 | 0.401 | 0.574 | 0.630 | 0.576 | 0.648 | 0.603 | 0.706 | 0.610 | 0.671 | 0.571 | 0.673 | 0.577 |
| 131 | XY-45 | 0.306 | 0.340 | 0.621 | 0.283 | 0.383 | 0.415 | 0.499 | 0.346 | 0.525 | 0.478 | 0.405 | 0.381 | 0.376 | 0.346 | 0.408 |
| 132 | XY-46 | 0.262 | 0.404 | 0.769 | 0.283 | 0.188 | 0.381 | 0.406 | 0.454 | 0.280 | 0.928 | 0.790 | 0.783 | 0.627 | 0.624 | 0.513 |
| 133 | XY-47 | 0.431 | 0.417 | 0.439 | 0.549 | 0.380 | 0.559 | 0.637 | 0.390 | 0.221 | 0.676 | 0.771 | 0.415 | 0.463 | 0.410 | 0.483 |
| 134 | XY-48 | 0.529 | 0.431 | 0.520 | 0.240 | 0.443 | 0.740 | 0.729 | 0.572 | 0.091 | 0.557 | 0.566 | 0.901 | 0.752 | 0.763 | 0.560 |
| 135 | XY-49 | 0.326 | 0.437 | 0.321 | 0.446 | 0.672 | 0.479 | 0.437 | 0.611 | 0.225 | 0.547 | 0.468 | 0.647 | 0.521 | 0.570 | 0.479 |
| 136 | XY-51 | 0.345 | 0.529 | 0.328 | 0.731 | 0.417 | 0.524 | 0.538 | 0.503 | 0.209 | 0.682 | 0.645 | 1.002 | 1.000 | 0.993 | 0.603 |
| 137 | XY-53 | 0.390 | 0.421 | 0.413 | 0.549 | 0.408 | 0.486 | 0.601 | 0.308 | 0.084 | 0.761 | 0.764 | 0.814 | 0.956 | 0.862 | 0.558 |
| 138 | XY-54 | 0.240 | 0.470 | 0.373 | 0.735 | 0.472 | 0.330 | 0.423 | 0.303 | 0.745 | 0.811 | 0.928 | 0.549 | 0.506 | 0.515 | 0.529 |
| 139 | XY-55 | 0.330 | 0.448 | 0.162 | 0.504 | 0.526 | 0.510 | 0.500 | 0.548 | 0.032 | 0.475 | 0.442 | 0.855 | 0.795 | 0.948 | 0.505 |
| 140 | XY-56 | 0.825 | 0.444 | 0.345 | 0.231 | 0.351 | 0.829 | 0.912 | 0.431 | 0.329 | 0.543 | 0.639 | 0.544 | 0.427 | 0.576 | 0.530 |
| 141 | XY-57 | 0.320 | 0.447 | 0.191 | 0.641 | 0.293 | 0.477 | 0.494 | 0.489 | 0.227 | 0.588 | 0.414 | 0.627 | 0.522 | 0.552 | 0.449 |
| 142 | XY-58 | 0.541 | 0.347 | 0.291 | 0.687 | 0.661 | 0.654 | 0.689 | 0.483 | 0.124 | 0.673 | 0.644 | 0.760 | 0.695 | 0.680 | 0.566 |
| 143 | XY-61 | 0.427 | 0.551 | 0.208 | 0.643 | 0.591 | 0.594 | 0.561 | 0.602 | 0.441 | 0.772 | 0.859 | 0.528 | 0.573 | 0.636 | 0.570 |
| 144 | XY-62 | 0.434 | 0.902 | 0.160 | 0.741 | 0.339 | 0.513 | 0.615 | 0.339 | 0.469 | 0.704 | 0.602 | 0.612 | 0.524 | 0.548 | 0.536 |
| 145 | XY-63 | 0.518 | 0.396 | 0.431 | 0.376 | 0.401 | 0.627 | 0.652 | 0.496 | 0.375 | 0.519 | 0.632 | 0.607 | 0.554 | 0.574 | 0.511 |
| 146 | XY-65 | 0.476 | 0.649 | 0.296 | 0.559 | 0.370 | 0.570 | 0.615 | 0.452 | 0.422 | 0.611 | 0.617 | 0.609 | 0.539 | 0.561 | 0.525 |
| 147 | XY-67 | 0.352 | 0.573 | 0.254 | 0.586 | 0.813 | 0.470 | 0.520 | 0.422 | 0.564 | 0.880 | 0.744 | 0.503 | 0.520 | 0.480 | 0.549 |
| 148 | XY-68 | 0.508 | 0.468 | 0.228 | 0.579 | 0.242 | 0.795 | 0.650 | 0.827 | 0.200 | 0.816 | 0.693 | 0.687 | 0.622 | 0.545 | 0.562 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 149 | XY-69 | 0.226 | 0.521 | 0.465 | 0.443 | 0.704 | 0.355 | 0.292 | 0.654 | 0.594 | 0.519 | 0.503 | 0.476 | 0.379 | 0.462 | 0.471 |
| 150 | XY-75 | 0.226 | 0.523 | 0.175 | 0.439 | 0.691 | 0.168 | 0.385 | 0.001 | 0.321 | 0.768 | 0.511 | 0.684 | 0.630 | 0.649 | 0.441 |
| 151 | XY-76 | 0.384 | 0.398 | 0.511 | 0.574 | 0.456 | 0.551 | 0.539 | 0.556 | 0.183 | 0.615 | 0.737 | 0.741 | 0.766 | 0.694 | 0.550 |
| 152 | XY-77 | 0.267 | 0.290 | 0.508 | 0.798 | 0.616 | 0.410 | 0.391 | 0.554 | 0.671 | 0.841 | 0.821 | 0.682 | 0.714 | 0.694 | 0.590 |
| 153 | XY-79 | 0.344 | 0.362 | 0.459 | 0.370 | 0.483 | 0.492 | 0.509 | 0.491 | 0.367 | 0.570 | 0.371 | 0.729 | 0.630 | 0.649 | 0.488 |
| 154 | XY-82 | 0.417 | 0.597 | 0.055 | 0.443 | 0.678 | 0.519 | 0.573 | 0.427 | 0.159 | 0.518 | 0.510 | 0.782 | 0.629 | 0.658 | 0.498 |
| 155 | XY-85 | 0.418 | 0.396 | 0.452 | 0.570 | 0.396 | 0.532 | 0.532 | 0.532 | 0.159 | 0.337 | 0.299 | 0.649 | 0.477 | 0.499 | 0.446 |
| 156 | XY-87 | 0.337 | 0.476 | 0.159 | 0.412 | 0.654 | 0.594 | 0.492 | 0.745 | 0.048 | 0.395 | 0.352 | 0.666 | 0.521 | 0.528 | 0.456 |
| 157 | XY-89 | 0.525 | 0.650 | 0.243 | 0.504 | 0.716 | 0.543 | 0.650 | 0.337 | 0.253 | 0.516 | 0.890 | 0.837 | 0.851 | 0.804 | 0.594 |
| 158 | XY-90 | 0.265 | 0.259 | 0.430 | 0.543 | 0.430 | 0.410 | 0.428 | 0.475 | 0.327 | 0.843 | 0.778 | 0.699 | 0.711 | 0.757 | 0.526 |
| 159 | XY-95 | 0.324 | 0.358 | 0.359 | 0.587 | 0.250 | 0.461 | 0.513 | 0.417 | 0.171 | 0.596 | 0.513 | 0.818 | 0.765 | 0.712 | 0.489 |
| 160 | 苹果王-1 | 0.181 | 0.413 | 0.540 | 0.564 | 0.541 | 0.258 | 0.282 | 0.432 | 0.029 | 0.576 | 0.415 | 0.954 | 0.924 | 0.869 | 0.499 |