

网络出版时间:2020-01-20 13:39 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2020.08.015
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200119.0923.010.html

苹果属植物抗旱性评价

杨 锋,刘 晨,姜丽娟,管清美

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】对 103 种苹果属植物的抗旱性进行综合评价,为抗旱苹果品种的选育及推广利用提供理论依据。【方法】以 103 种苹果属植物嫁接苗为试验材料,调查自然干旱 12 d 后植株的萎蔫程度,并测定干旱处理前后叶片相对电导率及可溶性蛋白和丙二醛含量,最后采用隶属函数法计算以上 4 个生理指标的平均隶属函数值,对 103 种植物进行抗旱性综合评价。【结果】干旱胁迫 12 d 后,各苹果属植物的萎蔫程度、相对电导率、可溶性蛋白含量、丙二醛含量均有明显变化。根据综合评价结果可知,在 103 种苹果属植物中,强抗旱(I 级)材料有 15 种,抗旱(II 级)材料有 32 种,中等抗旱(III 级)材料有 46 种,弱抗旱(IV 级)材料有 10 种,其中 15 种强抗旱苹果属植物分别为早红霞、红勋 1 号、富红早嘎、陆奥、早红 1 号、皇家嘎啦、太平洋玫瑰、阿莱特、N7、北海道 9 号、Goldgeld55544、Ce1、K296、福拉瑞娜、T22。【结论】筛选出 15 个适宜干旱半干旱地区种植的强大抗旱苹果属植物。

【关键词】 苹果属植物;抗旱性评价;苹果育种;隶属函数

【中图分类号】 S661.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)08-0119-10

Comprehensive evaluation on drought tolerance of *Malus*

YANG Feng,LIU Chen,JIANG Lijuan,GUAN Qingmei

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The drought tolerances of 103 *Malus* were evaluated to provide basis for breeding drought tolerant cultivars and promote the application of drought-tolerant *Malus*. 【Method】A total of 103 grafted plants of *Malus* were selected to investigate the wilting degree after 12 days of drought stress. Relative conductivity, soluble protein content and malondialdehyde content of leaves before and after drought stress were measured. The average membership function values of these four physiological indexes were calculated by a subordination function method to evaluate drought resistances of the 103 plants. 【Result】Wilting degree, relative conductivity, soluble protein content and malondialdehyde content of all species changed significantly after 12 days of drought stress. According to the results of comprehensive evaluation, there were 15 materials at level I (extremely tolerant to drought), 32 materials at level II (tolerant to drought), 46 materials at level III (moderately tolerant to drought) and 10 materials at level IV (weakly tolerant to drought). The 15 level I materials included Zaohongxia, Hongxun No. 1, Fuhongzaoga, Mutsu, Early red one, Royal Gala, Pacific Rose, Arlet, N7, Hokido No. 9, Goldgeld55544, Ce1, K296, Florina and T22. 【Conclusion】Fifteen extremely drought-tolerant apple materials suitable for cultivation in arid and semi-arid areas were identified.

Key words: *Malus* Mill.; drought tolerance evaluation; apple breeding; subordination function

〔收稿日期〕 2019-07-26

〔基金项目〕 国家自然科学基金项目(31622049)

〔作者简介〕 杨 锋(1995—),女,山西大同人,在读硕士,主要从事果树逆境生理研究。E-mail:1762437477@qq.com

〔通信作者〕 管清美(1979—),女,山东潍坊人,教授,博士生导师,主要从事果树逆境生理研究。E-mail:qguan@nwsuaf.edu.cn

苹果在世界范围内广泛栽培,深受人们喜爱,是我国产量最大的水果。干旱是影响苹果生长的重要限制因子,也是一种最为常见的非生物胁迫^[1]。我国约有 1/3 的地区处于干旱或半干旱区域,而在世界范围内,干旱区域的范围有逐年扩大的趋势^[2]。由于水分对植物体内的各种生理生化反应有重要作用,无论是长期干旱还是短期水分亏缺,都可能对植物体造成不可逆的伤害^[1,3]。据报道,由于水分胁迫导致的农作物减产超过其他环境胁迫所造成的农作物减产的总和^[4]。

抗旱性是植物对自然环境条件长期适应的结果,通常指植物通过一系列生理生化变化,抵御或忍受干旱环境的能力^[5]。目前植物抗旱性的鉴定方法主要分为直接鉴定法和间接鉴定法^[6]。直接鉴定法是使植物直接处于干旱环境中,通过对其生长状况(萎蔫程度)或生理过程的研究得出结论^[7]。间接鉴定法主要是通过抗旱性评价指标进行鉴定,如形态解剖结构指标、生长指标、生理生化指标、分子生物学指标,常用的指标有渗透调节物质(可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸等)、相对电导率、丙二醛(MDA)含量,保护酶(SOD、POD 等)活性等^[8],其中渗透调节物质^[9]、SOD 和 POD 活性^[10]与抗旱性呈正相关关系,相对电导率^[11]及 MDA 含量^[12]与抗旱性呈负相关关系。

在实际研究中,人们越来越多地采用多个指标对抗旱性进行综合评价,以降低单一指标的片面性。目前国内外关于苹果属植物抗旱性综合评价的研究较少,并且已有的研究试验材料少^[13-14]。本试验选择 103 个苹果属植物进行研究,经短期自然干旱,测定植株整体萎蔫程度、相对电导率、可溶性蛋白含量、MDA 含量,应用隶属函数法综合评价其抗旱性,以期抗旱苹果品种的选育及推广利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2017-01—2018-04 在陕西杨凌西北农林科技大学园艺场及早区作物逆境生物学国家重点实验室进行。试验材料为当年生 103 种苹果属植物(具体见表 1)的嫁接盆栽幼苗,砧木均为平邑甜茶,每种植物 10 盆,砧木平邑甜茶于 2017 年 3 月种植(选用上口口径 380 mm,下口径 155 mm,高 280 mm 的塑料盆种植,每盆装土 12 kg)。苹果属植物的接穗均采自西北农林科技大学园艺场苹果资源圃。

1.2 试验设计

于 2017 年 6 月,对生长 3 个月的嫁接盆栽苗进行短期自然干旱。在干旱处理前,所有材料均浇足水,于浇水后当日取新梢第 5—10 节位完全展开的叶片 10 片作为对照,之后对所有材料进行自然干旱处理,于干旱处理的第 12 天统计各种苹果属植物的萎蔫程度,同时选取植株从上到下第 5—10 节位的 10 片成熟叶片^[8],用于测定干旱前后叶片的相对电导率及 MDA、可溶性蛋白含量等指标。

1.3 指标测定

在干旱胁迫的第 12 天,采用直接鉴定法^[15],于上午 08:00 统计每种材料的萎蔫程度,具体标准为:保持常态者萎蔫度记为 0,叶片卷缩且 60% 以上的叶片下垂者萎蔫度记为 1。每种材料的萎蔫程度 = $\sum$ 各级别盆数 $\times$ 萎蔫度 / 总盆数。参照孙群等^[16]的方法测定叶片的 MDA、可溶性蛋白含量;参考文献^[17]采用电导仪测定相对电导率。每个指标测定时均设定 3 个生物学重复。

1.4 抗旱性综合评价

植物抗旱性是多种因素的复合表现,用单一指标判断有很大的片面性。本试验运用隶属函数分析^[18],以各指标的平均隶属函数值进行抗旱性综合评价。各指标平均隶属函数值的计算公式为:

当评价指标与抗旱性呈正相关关系时, $U_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$;当评价指标与抗旱性呈负相关关系时, $U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$ 。式中: U_{ij} 表示 i 种类 j 指标的抗旱隶属函数值,其中 i 表示某种苹果属植物, j 表示某项指标; X_{ij} 表示 i 种类 j 指标的测定值; $X_{j\min}$ 表示所有种类 j 指标的最小值; $X_{j\max}$ 表示所有种类 j 指标的最大值。

结合本研究的实际情况,将苹果属植物按照抗旱性隶属函数值划分为 4 级:隶属函数值 ≥ 0.75 为强抗旱材料,定为 I 级; $0.65 \leq$ 隶属函数值 < 0.75 为抗旱材料,定为 II 级; $0.5 \leq$ 隶属函数值 < 0.65 为中等抗旱材料,定为 III 级;隶属函数值 < 0.5 为弱抗旱材料,定为 IV 级。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫后苹果属植物的萎蔫程度

干旱胁迫后的萎蔫程度是植物内部水势情况和保护调节情况的外部形态表现,可直接反映植物的抗旱状况,在相同的干旱胁迫下,萎蔫程度越高,则植物的抗旱性越差^[15]。表 1 显示,在干旱胁迫第 12

天,K296、富红早嘎、太平洋玫瑰等 25 种苹果属植物 seedling 等 4 种的萎蔫程度达到 1.00。物萎蔫程度为 0,甘红、署红、比蒂格海姆、Bramley-

表 1 干旱胁迫后 103 种苹果属植物的萎蔫程度
Table 1 Wilting degree of 103 *Malus* after drought stress

名称 Name	萎蔫程度 Wilting degree	名称 Name	萎蔫程度 Wilting degree	名称 Name	萎蔫程度 Wilting degree
粉红女士 Pink Lady	0.33	比蒂格海姆 Bietigheimer	1.00	大都 Daitron	0.33
Roho3615	0.71	威廉姆斯女士 Lady Williams	0.14	H3	0.40
秋脆 Autumn Crisp	0.33	茜 Akane	0.50	Northfield Beauty	0.13
纽约 2 号 NY 2	0.25	Halerstadter Jungfermapfe	0.38	巴克艾 Buckeye	0.00
T22	0.33	Scheideckercrab	0.50	皮诺娃 Pinova	0.75
Zestar	0.71	瑞丹 Judaine	0.33	鲁宾斯 Rubens	0.00
K296	0.00	Cor-10-17	0.38	斯派克 Spike	0.11
富红早嘎 Fuhongzaoga	0.00	瑞星 Judestar	0.33	布瑞本 Braeburn	0.50
早红霞 Zaohongxia	0.14	新乔纳金 New Jonagold	0.71	Maririi Red	0.25
小国光 Ralls	0.44	瑞林 Jude-line	0.33	坎兹 Kanzi	0.11
GS58	0.56	A54	0.57	XIN1	0.88
2001 富士 Fuji 2001	0.13	N9	0.20	千秋 Senshu	0.33
太平洋玫瑰 Pacific Rose	0.00	昂林 Korin	0.71	Kiku	0.29
纽约 1 号 NY 1	0.86	秋光 Qiuguang	0.78	Pound Sweet	0.00
皇家嘎啦 Royal Gala	0.11	长富 2 号 Naganofuji No. 2	0.33	Unknown	0.80
王林 Orin	0.44	NJ-90	0.88	Sheepnose	0.14
首红 Redchief Delicious	0.00	弘前富士 Hirosakifuji	0.00	平成 Heisei	0.29
埃德尔博斯多夫 Edelborsdorfer	0.00	福拉瑞娜 Florina	0.00	爵士 Jazz	0.00
Challenger	0.00	阿肯色黑 Arkansasblack	0.17	Ce1	0.50
花嫁 Wealthy	0.75	红露 Hongro	0.29	魔笛 Modi	0.50
PaulaRed	0.80	早红 1 号 Early red one	0.14	阿莱特 Arlet	0.00
甘红 Ganhong	1.00	Ce2	0.63	凉香 Ryoka	0.25
Gloster69	0.00	夕阳 Sundowner	0.56	秦阳 Qinyang	0.00
蓝皮尔曼 Blue Pearman	0.20	丽嘎啦 Regal Gala	0.43	Bramleyseedling	1.00
寒富 Hanfu	0.00	Chanterler	0.88	晨雾 Morning Mist	0.50
美味 Ambrosia	0.00	金红 Jinhong	0.14	Xin4	0.57
Chinook	0.43	信浓红 CinanoRed	0.43	陆奥 Mutsu	0.00
Ruby Mac	0.00	粉金 Pinkgold	0.33	阿丽亚娜 Ariane	0.44
凉香的季节 Ryoka no Kisetsu	0.33	艾达红 Idared	0.25	红勋 1 号 Hongxun No. 1	0.25
信浓甜 Cinano Sweet	0.22	富士冠军 Fuji Champion	0.00	瑞莲娜 Juliana	0.22
署红 James Grieve	1.00	信浓金 Cinano Gold	0.57	北海道 9 号 Hokkaido No. 9	0.00
Trail	0.67	荷斯坦 Holstein	0.33	Goldgeld55544	0.00
Redcord	0.00	赫拉森 Haralson	0.00	Seromine	0.25
北斗 Hokudo	0.56	玫瑰光芒 Rosy Glow	0.63		
N7	0.00	蜜脆 Honeycrisp	0.33		

2.2 干旱胁迫对苹果属植物叶片相对电导率的影响

叶片的相对电导率可以反映出逆境胁迫对植物的伤害程度,干旱胁迫会使叶片细胞的质膜透性增大,相对电导率上升^[19]。相对电导率大,表明质膜受破坏的程度大,因此在同样的干旱胁迫条件下,相对电导率越大,植物的抗旱性越差^[20]。干旱胁迫对 103 种苹果属植物叶片相对电导率的影响见表 2。表 2 显示,与干旱处理前相比,短期自然干旱处理后,粉红女士、Roho3615、T22 等 89 种苹果属植物

的相对电导率上升,其中上升幅度较大的 5 种植物分别为 Trail、弘前富士、长富 2 号、署红、凉香;秋脆、纽约 2 号、K296 等 14 种植物的相对电导率下降,其中下降幅度最大的植物是 K296,其相对电导率下降了28.08%。干旱胁迫第 12 天,相对电导率较高的 5 种苹果属植物分别为 Trail、弘前富士、署红、长富 2 号、凉香,相对电导率较低的 5 种苹果属植物分别为 Goldgeld55544、K296、小国光、早红霞、埃德尔博斯多夫。

表 2 干旱胁迫对 103 种苹果属植物叶片相对电导率的影响

Table 2 Effects of drought stress on relative conductivity of 103 <i>Malus</i> leaves									%
名称 Name	干旱处 理前 Before drought stress	干旱处 理后 After drought stress	名称 Name	干旱处 理前 Before drought stress	干旱处 理后 After drought stress	名称 Name	干旱处 理前 Before drought stress	干旱处 理后 After drought stress	
粉红女士 Pink Lady	9.57	11.39	比蒂格海姆 Bietigheimer	9.18	15.34	大都 Daitron	12.26	13.32	
Roho3615	10.91	11.33	威廉姆斯女士 Lady Williams	9.45	14.45	H3	9.91	11.05	
秋脆 Autumn Crisp	13.02	12.92	茜 Akane	11.27	13.86	Northfield Beauty	11.44	16.75	
纽约 2 号 NY 2	12.80	11.72	Halerstadter Jungfermapfe	11.11	12.10	巴克艾 Buckeye	11.46	13.33	
T22	11.49	11.91	Scheideckercrab	8.87	14.78	皮诺娃 Pinova	14.70	13.78	
Zestar	11.76	12.11	瑞丹 Judaine	10.94	12.88	鲁宾斯 Rubens	9.91	20.08	
K296	12.37	8.90	Cor-10-17	8.98	16.82	斯派克 Spike	10.08	14.10	
富红早嘎 Fuhongzaoga	11.04	10.72	瑞星 Judestar	8.43	10.93	布瑞本 Braeburn	10.93	14.64	
早红霞 Zaohongxia	8.04	9.49	新乔纳金 New Jonagold	9.24	11.62	Maririi Red	10.27	18.14	
小国光 Ralls	10.38	9.30	瑞林 Jude-line	7.62	13.43	坎兹 Kanzi	9.34	15.90	
GS58	12.16	10.25	A54	8.38	11.02	XIN1	10.90	15.12	
2001 富士 Fuji 2001	11.54	15.50	N9	9.93	12.96	千秋 Senshu	9.01	14.40	
太平洋玫瑰 Pacific Rose	10.73	11.64	昂林 Korin	8.11	9.64	Kiku	8.48	12.47	
纽约 1 号 NY 1	11.59	11.67	秋光 Qiuguang	10.19	12.20	Pound Sweet	12.90	16.86	
皇家嘎啦 Royal Gala	10.79	11.30	长富 2 号 Naganofuji No. 2	9.34	29.04	Unknown	10.63	15.01	
王林 Orin	7.63	13.53	NJ-90	13.93	11.35	Sheepnose	10.13	11.81	
首红 Redchief Delicious	10.16	11.64	弘前富士 Hirosakifuji	9.47	31.95	平成 Heisei	9.94	14.66	
埃德尔博斯多夫 Edelborsdorfer	8.65	9.64	福拉瑞娜 Florina	9.26	10.76	爵士 Jazz	9.56	13.71	
Challenger	11.79	20.59	阿肯色黑 Arkansasblack	9.39	12.56	Ce1	10.19	11.56	
花嫁 Wealthy	11.88	10.80	红露 Hongro	9.39	17.38	魔笛 Modi	8.72	11.15	
PaulaRed	8.88	10.07	早红 1 号 Early red one	8.37	9.72	阿莱特 Arlet	9.60	10.16	
甘红 Ganhong	8.38	12.82	Ce2	9.50	18.76	凉香 Ryoka	9.36	23.92	
Gloster69	8.82	11.84	夕阳 Sundowner	7.41	14.90	秦阳 Qinyang	10.11	14.22	
蓝皮尔曼 Blue Pearman	13.50	13.37	丽嘎啦 Regal Gala	10.32	12.39	Bramleyseedling	13.77	13.55	
寒富 Hanfu	10.62	14.49	Chanterler	8.21	11.25	晨雾 Morning Mist	9.87	21.06	
美味 Ambrosia	9.34	12.02	金红 Jinhong	7.57	13.12	Xin4	10.47	10.75	
Chinook	10.37	16.95	信浓红 CinanoRed	10.18	14.92	陆奥 Mutsu	11.05	10.12	
Ruby Mac	12.46	15.21	粉金 Pinkgold	8.76	10.44	阿丽亚娜 Ariane	7.35	9.89	
凉香的季节 Ryoka no Kisettsu	9.86	14.07	艾达红 Idared	10.79	11.63	红勋 1 号 Hongxun No. 1	9.11	10.43	
信浓甜 Cinano Sweet	9.05	17.58	富士冠军 Fuji Champion	8.76	10.73	瑞莲娜 Juliana	9.62	10.93	
署红 James Grieve	9.84	29.28	信浓金 Cinano Gold	9.25	11.21	北海道 9 号 Hokkaido No. 9	13.61	11.53	
Trail	9.41	32.45	荷斯坦 Holstein	10.73	14.66	Goldgeld55544	9.42	7.53	
Redcord	10.01	11.35	赫拉森 Haralson	11.68	12.46	Seromine	8.67	10.74	
北斗 Hokudo	10.56	13.62	玫瑰光芒 Rosy Glow	9.05	11.53				
N7	11.03	11.44	蜜脆 Honeycrisp	12.08	14.40				

2.3 干旱胁迫对苹果属植物叶片可溶性蛋白含量的影响

研究表明,植物体内的有机溶质(如可溶性蛋白等)对干旱胁迫会产生响应^[21],一般来说可溶性蛋白含量高有利于植物体内渗透压的调节,对维持植物正常的生理生化反应有积极作用。

干旱胁迫对 103 种苹果属植物叶片可溶性蛋白含量的影响结果见表 3。表 3 显示,干旱胁迫后 Ro-ho3615、秋脆、T22 等 83 种苹果属植物的可溶性蛋

白含量上升,其中上升幅度由大到小的前 5 种植物依次为 Maririi Red、威廉姆斯女士、早红霞、甘红、坎兹;粉红女士、纽约 2 号、王林等 20 种苹果属植物的可溶性蛋白含量下降,其中下降幅度由大到小的前 5 种植物依次为 Ce2、Ruby Mac、王林、斯派克、玫瑰光芒。干旱胁迫第 12 天,可溶性蛋白含量较大的 5 种苹果属植物分别为署红、红勋 1 号、Ce1、早红霞、晨雾,可溶性蛋白含量较小的 5 种植物分别为小国光、埃德尔博斯多夫、茜、蜜脆、花嫁。

表 3 干旱胁迫对 103 种苹果属植物叶片可溶性蛋白含量的影响

Table 3 Effect of drought stress on soluble protein content of 103 <i>Malus</i> leaves			mg/g		
名称 Name	干旱处理前 Before drought stress	干旱处理后 After drought stress	名称 Name	干旱处理前 Before drought stress	干旱处理后 After drought stress
粉红女士 Pink Lady	38.03	37.10	比蒂格洛姆 Bietigheimer	20.15	35.33
Roho3615	34.39	46.64	威廉姆斯女士 Lady Williams	23.50	49.03
秋脆 Autumn Crisp	31.99	41.96	茜 Akane	28.65	26.64
纽约 2 号 NY 2	31.15	30.96	Halerstadter Jungfermapfe	26.93	32.81
T22	30.68	55.79	Scheideckercrab	34.99	41.07
Zestar	36.78	56.39	瑞丹 Judaine	31.67	32.50
K296	27.66	46.90	Cor-10-17	32.19	33.93
富红早嘎 Fuhongzaoga	32.82	52.29	瑞星 Judestar	25.47	41.27
早红霞 Zaohongxia	31.90	66.08	新乔纳金 New Jonagold	40.06	54.46
小国光 Ralls	24.29	25.60	瑞林 Jude-line	31.46	44.50
GS58	37.90	48.17	A54	30.33	45.18
2001 富士 Fuji 2001	35.68	43.64	N9	30.25	49.71
太平洋玫瑰 Pacific Rose	35.89	49.99	昂林 Korin	29.58	33.49
纽约 1 号 NY 1	25.28	35.20	秋光 Qiuguang	38.99	40.00
皇家嘎啦 Royal Gala	34.84	59.63	长富 2 号 Naganofuji No. 2	41.04	63.44
王林 Orin	46.26	39.15	NJ-90	32.69	32.31
首红 Redchief Delicious	19.89	35.50	弘前富士 Hirosakifuji	42.41	48.90
埃德尔博斯多夫 Edelborsdorfer	16.59	26.20	福拉瑞娜 Florina	32.98	38.76
Challenger	31.72	37.57	阿肯色黑 Arkansasblack	38.77	44.33
花嫁 Wealthy	30.51	29.42	红露 Hongro	47.60	48.03
PaulaRed	34.23	32.33	早红 1 号 Early red one	43.98	54.30
甘红 Ganhong	29.81	54.88	Ce2	43.67	31.68
Gloster69	25.96	35.26	夕阳 Sundowner	35.89	40.97
蓝皮尔曼 Blue Pearman	32.97	53.09	丽嘎啦 Regal Gala	45.25	47.70
寒富 Hanfu	31.78	41.06	Chanterler	22.61	36.46
美味 Ambrosia	32.34	43.39	金红 Jinhong	30.06	30.32
Chinook	40.84	56.74	信浓红 CinanoRed	27.51	30.31
Ruby Mac	43.32	31.89	粉金 Pinkgold	31.79	45.49
凉香的季节 Ryoka no Kisetsu	35.59	40.33	艾达红 Idared	25.58	31.02
信浓甜 Cinano Sweet	33.68	33.62	富士冠军 Fuji Champion	25.57	32.67
署红 James Grieve	45.47	73.55	信浓金 Cinano Gold	29.55	32.71
Trail	39.33	38.78	荷斯坦 Holstein	37.54	47.41
Redcord	31.91	30.96	赫拉森 Haralson	30.78	30.18
北斗 Hokudo	34.63	33.40	玫瑰光芒 Rosy Glow	40.86	36.31
N7	32.37	44.64	蜜脆 Honeycrisp	28.17	28.08
			大都 Daitron	41.19	43.87
			H3	17.54	31.92
			Northfield Beauty	49.89	53.41
			巴克艾 Buckeye	44.07	53.39
			皮诺娃 Pinova	40.54	45.51
			鲁宾斯 Rubens	37.07	45.89
			斯派克 Spike	33.68	29.73
			布瑞本 Braeburn	28.38	31.41
			Maririi Red	17.63	46.92
			坎兹 Kanzi	28.54	51.96
			XIN1	41.21	41.24
			千秋 Senshu	36.40	59.48
			Kiku	34.38	45.37
			Pound Sweet	36.41	38.80
			Unknown	39.59	43.50
			Sheepnose	41.80	65.72
			平成 Heisei	34.04	52.06
			爵士 Jazz	31.15	45.03
			Ce1	61.54	68.30
			魔笛 Modi	29.87	43.06
			阿莱特 Arlet	35.51	42.31
			凉香 Ryoka	38.56	43.88
			秦阳 Qinyang	35.14	38.63
			Bramleyseedling	36.21	59.37
			晨雾 Morning Mist	43.20	65.89
			Xin4	37.79	37.15
			陆奥 Mutsu	46.57	55.01
			阿丽亚娜 Ariane	40.76	53.41
			红勋 1 号 Hongxn No. 1	48.70	69.51
			瑞莲娜 Juliana	25.67	35.30
			北海道 9 号 Hokkaido No. 9	39.76	41.28
			Goldgeld55544	34.22	31.28
			Seromine	41.34	37.26

2.4 干旱胁迫对苹果属植物叶片 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂过氧化的主要产物之一，是一种具有细胞毒性的物质，其含量常作为判断膜脂过氧化程度的主要指标，一般认为抗旱性强的植物 MDA 含量低^[22]。

表 4 显示，干旱胁迫后 Zestar、K296、小国光等 44 种苹果属植物的 MDA 含量上升，其中上升幅度由大到小的前 5 种植物依次为 XIN1、甘红、信浓甜、

署红、巴克艾；粉红女士、Roho3615、秋脆等 59 种苹果属植物的 MDA 含量下降，其中下降幅度由大到小的前 5 种植物依次为 NJ-90、北海道 9 号、Redcord、纽约 2 号、Scheideckercrab。干旱胁迫第 12 天，MDA 含量较高的 5 种苹果属植物分别为信浓甜、署红、Ce2、Sheepnose、弘前富士，MDA 含量较低的 5 种植物分别为纽约 2 号、Paula Red、早红霞、NJ-90、Goldgeld55544。

表 4 干旱胁迫对 103 种苹果属植物叶片 MDA 含量的影响

Table 4 Effect of drought stress on MDA content of 103 *Malus* leaves

μmol/g

名称 Name	干旱处理前 Before drought stress	干旱处理后 After drought stress	名称 Name	干旱处理前 Before drought stress	干旱处理后 After drought stress	名称 Name	干旱处理前 Before drought stress	干旱处理后 After drought stress
粉红女士 Pink Lady	43.63	37.79	比蒂格海姆 Bietigheimer	80.87	49.64	大都 Daitron	76.53	68.01
Roho3615	72.34	41.54	威廉姆斯女士 Lady Williams	97.45	51.45	H3	49.77	46.20
秋脆 Autumn Crisp	90.11	58.75	茜 Akane	73.26	42.20	Northfield Beauty	35.93	96.29
纽约 2 号 NY 2	49.71	18.08	Halerstadter Jungfermapfe	50.78	44.12	巴克艾 Buckeye	36.46	110.48
T22	74.60	37.38	Scheideckercrab	73.28	27.72	皮诺娃 Pinova	97.93	66.26
Zestar	41.60	65.21	瑞丹 Judaine	55.75	35.59	鲁宾斯 Rubens	87.59	73.10
K296	54.66	75.84	Cor-10-17	47.61	36.23	斯派克 Spike	39.61	66.33
富红早嘎 Fuhongzaoga	83.95	37.91	瑞星 Judestar	58.53	32.71	布瑞本 Braeburn	55.21	92.58
早红霞 Zaohongxia	62.09	24.78	新乔纳金 New Jonagold	62.89	51.96	Maririi Red	52.15	83.13
小国光 Ralls	58.05	104.19	瑞林 Jude-line	88.61	57.65	坎兹 Kanzi	79.84	43.19
GS58	51.12	38.07	A54	54.54	79.34	XIN1	5.86	67.95
2001 富士 Fuji 2001	91.10	67.77	N9	105.46	66.89	千秋 Senshu	44.48	91.59
太平洋玫瑰 Pacific Rose	86.98	48.20	昂林 Korin	87.03	34.19	Kiku	78.11	70.10
纽约 1 号 NY 1	80.60	41.11	秋光 Qiuguang	52.45	45.45	Pound Sweet	47.70	74.91
皇家嘎啦 Royal Gala	43.18	64.21	长富 2 号 Naganofuji No. 2	44.51	48.15	Unknown	47.81	53.17
王林 Orin	67.00	65.24	NJ-90	106.79	26.45	Sheepnose	57.82	125.29
首红 Redchief Delicious	49.37	71.06	弘前富士 Hirosakifuji	65.30	117.21	平成 Heisei	56.50	52.95
埃德尔博斯多夫 Edelborsdorfer	40.81	27.89	福拉瑞娜 Florina	64.32	39.86	爵士 Jazz	50.54	78.67
Challenger	82.15	49.47	阿肯色黑 Arkansasblack	64.07	30.39	Ce1	33.27	48.76
花嫁 Wealthy	47.72	40.65	红露 Hongro	57.57	75.22	魔笛 Modi	35.04	71.49
PaulaRed	43.17	24.67	早红 1 号 Early red one	85.20	47.22	阿莱特 Arlet	63.69	34.01
甘红 Ganhong	9.28	69.13	Ce2	58.30	126.91	凉香 Ryoka	41.71	68.71
Gloster69	52.14	70.78	夕阳 Sundowner	68.02	69.48	秦阳 Qinyang	52.59	81.49
蓝皮尔曼 Blue Pearman	38.50	46.56	丽嘎啦 Regal Gala	34.97	41.91	Bramleyseedling	51.81	36.53
寒富 Hanfu	59.07	64.41	Chanterler	111.06	59.61	晨雾 Morning Mist	57.69	104.17
美味 Ambrosia	56.97	81.11	金红 Jinhong	86.27	84.90	Xin4	97.61	66.65
Chinook	66.31	63.79	信浓红 CinanoRed	51.95	61.34	陆奥 Mutsu	50.51	54.63
Ruby Mac	60.66	59.09	粉金 Pinkgold	73.25	52.11	阿丽亚娜 Ariane	42.23	35.76
凉香的季节 Ryoka no Kiset-su	35.62	50.78	艾达红 Idared	57.19	44.95	红勋 1 号 Hongxun No. 1	29.25	44.47
信浓甜 Cinano Sweet	39.51	144.71	富士冠军 Fuji Champion	53.03	29.90	瑞莲娜 Juliana	54.57	87.06
署红 James Grieve	43.03	132.69	信浓金 Cinano Gold	56.18	70.97	北海道 9 号 Hokkaido No. 9	85.37	27.69
Trail	93.32	101.26	荷斯坦 Holstein	82.83	65.66	Goldgeld55544	60.33	27.23
Redcord	104.52	34.80	赫拉森 Haralson	57.36	54.68	Seromine	42.20	47.18
北斗 Hokudo	87.36	48.06	玫瑰光芒 Rosy Glow	43.64	73.77			
N7	83.72	35.98	蜜脆 Honeycrisp	60.45	39.17			

2.5 103 种苹果属植物抗旱性的综合评价

本研究以短期自然干旱胁迫后各评价指标的平均隶属函数值作为综合评价指标,对 103 种苹果属植物的抗旱性进行综合评价,平均隶属函数值越大,则抗旱性越强。103 种苹果属植物的抗旱性综合评价结果见表 5。从表 5 可以看出,抗旱性较强的 5 种苹果属植物分别为早红霞、红勋 1 号、富红早嘎、陆奥、早红 1 号,抗旱性较弱的 5 种植物分别为

Trail、Ce2、署红、比蒂格海姆、信浓甜。将所有材料根据平均隶属函数值共分为 4 个等级,Ⅰ级为强抗旱,有 15 种;Ⅱ级为抗旱,有 32 种;Ⅲ级为中等抗旱,有 46 种;Ⅳ级为弱抗旱,有 10 种。15 种强抗旱苹果属植物分别为早红霞、红勋 1 号、富红早嘎、陆奥、早红 1 号、皇家嘎啦、太平洋玫瑰、阿莱特、N7、北海道 9 号、Goldgeld55544、Ce1、K296、福拉瑞娜、T22。

表 5 103 种苹果属植物的抗旱性综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation on drought tolerance of 103 *Malus*

名称 Name	隶属函数值 Subordinate function values					抗旱类型 Drought tolerance	排序 Rank
	萎蔫程度 Wilting degree	相对电导率 RC	可溶性蛋白 Pro	丙二醛 MDA	平均 Average		
粉红女士 Pink Lady	0.67	0.84	0.24	0.88	0.66	Ⅱ	42
Roho3615	0.29	0.85	0.44	0.86	0.61	Ⅲ	64
秋脆 Autumn Crisp	0.67	0.78	0.34	0.76	0.64	Ⅲ	52
纽约 2 号 NY2	0.75	0.83	0.11	1.00	0.67	Ⅱ	36
T22	0.67	0.82	0.63	0.89	0.75	Ⅰ	15
Zestar	0.29	0.82	0.64	0.72	0.62	Ⅲ	60
K296	1.00	0.95	0.44	0.66	0.76	Ⅰ	13
富红早嘎 Fuhongzaoga	1.00	0.87	0.56	0.88	0.83	Ⅰ	3
早红霞 Zaohongxia	0.86	0.92	0.84	0.96	0.90	Ⅰ	1
小国光 Ralls	0.56	0.93	0.00	0.49	0.49	Ⅳ	94
GS58	0.44	0.89	0.47	0.88	0.67	Ⅱ	38
2001 富士 Fuji 2001	0.88	0.68	0.38	0.70	0.66	Ⅱ	41
太平洋玫瑰 Pacific Rose	1.00	0.84	0.51	0.82	0.79	Ⅰ	7
纽约 1 号 NY 1	0.14	0.83	0.20	0.86	0.51	Ⅲ	93
皇家嘎啦 Royal Gala	0.89	0.85	0.71	0.73	0.79	Ⅰ	6
王林 Orin	0.56	0.76	0.28	0.72	0.58	Ⅲ	75
首红 Redchief Delicious	1.00	0.84	0.21	0.68	0.68	Ⅱ	33
埃德尔博斯多夫 Edelborsdorfer	1.00	0.92	0.01	0.94	0.72	Ⅱ	22
Challenger	1.00	0.48	0.25	0.81	0.63	Ⅲ	53
花嫁 Wealthy	0.25	0.87	0.08	0.87	0.52	Ⅲ	90
PaulaRed	0.20	0.90	0.14	0.96	0.55	Ⅲ	79
甘红 Ganhong	0.00	0.79	0.61	0.70	0.52	Ⅲ	89
Gloster69	1.00	0.83	0.20	0.69	0.68	Ⅱ	34
蓝皮尔曼 Blue Pearman	0.80	0.77	0.57	0.83	0.74	Ⅱ	16
寒富 Hanfu	1.00	0.72	0.32	0.72	0.69	Ⅱ	31
美味 Ambrosia	1.00	0.82	0.37	0.62	0.70	Ⅱ	25
Chinook	0.57	0.62	0.65	0.73	0.64	Ⅲ	49
Ruby Mac	1.00	0.69	0.13	0.76	0.64	Ⅲ	48
凉香的季节 Ryoka no Kisetu	0.67	0.74	0.31	0.81	0.63	Ⅲ	57
信浓甜 Cinano Sweet	0.78	0.60	0.17	0.25	0.45	Ⅳ	99
署红 James Grieve	0.00	0.13	1.00	0.32	0.36	Ⅳ	101
Trail	0.33	0.00	0.27	0.50	0.28	Ⅳ	103
Redcord	1.00	0.85	0.11	0.90	0.71	Ⅱ	24
北斗 Hokudo	0.44	0.76	0.16	0.82	0.55	Ⅲ	80
N7	1.00	0.84	0.40	0.89	0.78	Ⅰ	9
比蒂格海姆 Bietigheimer	0.00	0.69	0.20	0.81	0.43	Ⅳ	100
威廉姆斯女士 Lady Williams	0.86	0.72	0.49	0.80	0.72	Ⅱ	23
茜 Akane	0.50	0.75	0.02	0.86	0.53	Ⅲ	85
Halerstadter Jungfermapfe	0.63	0.82	0.15	0.84	0.61	Ⅲ	62
Scheideckercrab	0.50	0.71	0.32	0.94	0.62	Ⅲ	59
瑞丹 Judaine	0.67	0.79	0.14	0.90	0.62	Ⅲ	58
Cor-10-17	0.63	0.63	0.17	0.89	0.58	Ⅲ	73
瑞星 Judestar	0.67	0.86	0.33	0.91	0.69	Ⅱ	30
新乔纳金 New Jonagold	0.29	0.84	0.60	0.80	0.63	Ⅲ	55
瑞林 Jude-line	0.67	0.76	0.39	0.76	0.65	Ⅱ	47
A54	0.43	0.86	0.41	0.64	0.58	Ⅲ	72
N9	0.80	0.78	0.50	0.71	0.70	Ⅱ	28
昂林 Korin	0.29	0.92	0.16	0.90	0.57	Ⅲ	77
秋光 Qiuguang	0.22	0.81	0.30	0.84	0.54	Ⅲ	82
长富 2 号 Naganofuji No. 2	0.67	0.14	0.79	0.82	0.60	Ⅲ	67
NJ-90	0.13	0.85	0.14	0.95	0.52	Ⅲ	92
弘前富士 Hirosakifuji	1.00	0.02	0.49	0.41	0.48	Ⅳ	96

表 5(续) Continued table 5

名称 Name	隶属函数值 Subordinate function values					抗旱类型 Drought tolerance	排序 Rank
	萎蔫程度 Wilting degree	相对电导率 RC	可溶性蛋白 Pro	丙二醛 MDA	平均 Average		
福拉瑞娜 Florina	1.00	0.87	0.27	0.87	0.75	I	14
阿肯色黑 Arkansasblack	0.83	0.80	0.39	0.93	0.74	II	19
红露 Hongro	0.71	0.60	0.47	0.66	0.61	III	61
早红 1 号 Early red one	0.86	0.91	0.60	0.83	0.80	I	5
Ce2	0.38	0.55	0.13	0.35	0.35	IV	102
夕阳 Sundowner	0.44	0.70	0.32	0.69	0.54	III	83
丽嘎啦 Regal Gala	0.57	0.81	0.46	0.86	0.67	II	35
Chanterler	0.13	0.85	0.23	0.75	0.49	IV	95
金红 Jinhong	0.86	0.78	0.10	0.60	0.58	III	71
信浓红 CinanoRed	0.57	0.70	0.10	0.74	0.53	III	86
粉金 Pinkgold	0.67	0.88	0.41	0.80	0.69	II	32
艾达红 Idared	0.75	0.84	0.11	0.84	0.63	III	54
富士冠军 Fuji Champion	1.00	0.87	0.15	0.93	0.74	II	18
信浓金 Cinano Gold	0.43	0.85	0.15	0.69	0.53	III	87
荷斯坦 Holstein	0.67	0.71	0.45	0.72	0.64	III	51
赫拉森 Haralson	1.00	0.80	0.10	0.78	0.67	II	39
玫瑰光芒 Rosy Glow	0.38	0.84	0.22	0.67	0.53	III	88
蜜脆 Honeycrisp	0.67	0.72	0.05	0.87	0.58	III	74
大都 Daitron	0.67	0.77	0.38	0.70	0.63	III	56
H3	0.60	0.86	0.13	0.83	0.61	III	66
Northfield Beauty	0.88	0.63	0.58	0.53	0.65	II	44
巴克艾 Buckeye	1.00	0.77	0.58	0.45	0.70	II	26
皮诺娃 Pinova	0.25	0.75	0.42	0.71	0.53	III	84
鲁宾斯 Rubens	1.00	0.50	0.42	0.67	0.65	II	46
斯派克 Spike	0.89	0.74	0.09	0.71	0.61	III	65
布瑞本 Braeburn	0.50	0.71	0.12	0.56	0.47	IV	97
Maririi Red	0.75	0.57	0.44	0.61	0.60	III	69
坎兹 Kanzi	0.89	0.66	0.55	0.85	0.74	II	17
XIN1	0.13	0.70	0.33	0.70	0.46	IV	98
千秋 Senshu	0.67	0.72	0.71	0.56	0.66	II	40
Kiku	0.71	0.80	0.41	0.69	0.65	II	45
Pound Sweet	1.00	0.63	0.28	0.66	0.64	III	50
Unknown	0.20	0.70	0.37	0.79	0.52	III	91
Sheepnose	0.86	0.83	0.84	0.36	0.72	II	21
平成 Heisei	0.71	0.71	0.55	0.79	0.69	II	29
爵士 Jazz	1.00	0.75	0.41	0.64	0.70	II	27
Ce1	0.50	0.84	0.89	0.82	0.76	I	12
魔笛 Modi	0.50	0.85	0.36	0.68	0.60	III	68
阿莱特 Arlet	1.00	0.89	0.35	0.91	0.79	I	8
凉香 Ryoka	0.75	0.34	0.38	0.70	0.54	III	81
秦阳 Qinyang	1.00	0.73	0.27	0.62	0.66	II	43
Bramleyseedling	0.00	0.76	0.70	0.89	0.59	III	70
晨雾 Morning Mist	0.50	0.46	0.84	0.49	0.57	III	76
Xin4	0.43	0.87	0.24	0.71	0.56	III	78
陆奥 Mutsu	1.00	0.90	0.61	0.78	0.82	I	4
阿丽亚娜 Ariane	0.56	0.91	0.58	0.89	0.73	II	20
红勋 1 号 Hongxun No. 1	0.75	0.88	0.92	0.84	0.85	I	2
瑞莲娜 Juliana	0.78	0.86	0.20	0.59	0.61	III	63
北海道 9 号 Hokkaido No. 9	1.00	0.84	0.33	0.94	0.78	I	10
Goldgeld55544	1.00	1.00	0.12	0.95	0.77	I	11
Seromine	0.75	0.87	0.24	0.83	0.67	II	37

3 讨 论

干旱胁迫下,植物细胞会受到损伤,不同的植物由于内部生理生化反应的差异,会表现出不同的外

部特征^[23],短期干旱胁迫下,叶片色泽会发生改变,且往往还伴随着不同程度的萎蔫,通常认为萎蔫程度小的苹果属植物,具有更强的抗旱性^[24]。本研究中,干旱胁迫第 12 天,有 25 种苹果属植物的萎蔫程

度为 0,这 25 种材料中除 Ruby Mac、Pound Sweet、Challenger 为中等抗旱(Ⅲ级)材料,弘前富士为弱抗旱(Ⅳ级)材料外,其他的均为强抗旱(Ⅰ级)或抗旱(Ⅱ级)材料。

干旱胁迫下,细胞质膜透性增强,相对电导率升高,一般相对电导率越大,植物抗旱性越弱^[25]。本研究中,干旱胁迫后小国光、早红霞等材料的相对电导率较小,具有较强的抗旱能力;14 种材料干旱胁迫后相对电导率下降,这可能与采样叶片本身差异及植物体内部分可溶性渗透调节物质的分解有关。干旱会导致植物膜脂过氧化,产生大量 MDA,MDA 含量与抗旱性常呈负相关关系,通常干旱胁迫后植物体内 MDA 含量上升^[26]。本研究中,部分苹果属植物干旱胁迫后 MDA 含量降低,这可能是干旱胁迫后期,叶片细胞受损严重甚至死亡,导致部分 MDA 分解所致^[27],也可能是相关苹果属植物内部具有的保护机制使 MDA 降解导致含量下降^[28]。此外,在本研究中,相对电导率大的苹果属植物,其 MDA 含量也相对较高,这与前人的研究结果^[29]一致。

可溶性蛋白是植物细胞内一种重要的渗透调节物质,是植株抗逆的重要物质基础,可溶性蛋白含量高的苹果属植物具有更强的抗旱潜力^[30]。本研究中,干旱胁迫后红勋 1 号、早红霞等 MDA 含量、相对电导率以及萎蔫程度总体偏低,可溶性蛋白含量较高。对于不同的苹果属植物,干旱导致的生理指标的响应程度存在明显差异,这反映出各种苹果属植物具有不同的生物特性^[13]。一般而言,植物的相对电导率、可溶性蛋白含量、MDA 含量 3 项指标在干旱胁迫下呈现上升趋势,但在本试验中,有 14 种材料的相对电导率下降,20 种材料的可溶性蛋白含量下降,57 种材料的 MDA 含量下降,还有少量材料在干旱胁迫后相对电导率或可溶性蛋白含量与干旱处理前相差不大,这些现象可能是由于部分材料为适应干旱胁迫,体内相关抗旱基因发挥了作用,产生了相应的抗旱防御和保护作用,可能与激素调控^[31]、调节蛋白的含量增加^[32]等有关。这表明,植物体内可能存在一个系统的分子机制来应对干旱胁迫^[33],但具体机制还需要进一步深入研究。因此未来的研究方向是如何挖掘苹果属植物相关抗旱基因,并对其功能进行分析,以探明抗旱的分子机制。

4 结 论

103 种苹果属植物中,强抗旱材料有 15 种,抗旱材料有 32 种,中等抗旱材料有 46 种,弱抗旱材料

有 10 种,其中强抗旱材料分别为早红霞、红勋 1 号、富红早嘎、陆奥、早红 1 号、皇家嘎啦、太平洋玫瑰、阿莱特、N7、北海道 9 号、Goldgeld55544、Ce1、K296、福拉瑞娜、T22。在一些严重干旱地区,可以从这 15 种强抗旱苹果属植物中选取一些品种进行种植或者作为砧木。

[参考文献]

- [1] 李瑞雪,孙任洁,汪泰初,等. 植物抗旱性鉴定评价方法及抗旱机制研究进展 [J]. 生物技术通报,2017,33(7):40-48.
Li R X, Sun R J, Wang T C, et al. Research progress on identification and evaluation methods, and mechanism of drought resistance in plants [J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(7): 40-48.
- [2] Wilhite D A, Sivakumar M V K, Pulwarty R. Managing drought risk in a changing climate: the role of national drought policy [J]. Weather & Climate Extremes, 2014, 3: 4-13.
- [3] Feller U. Drought stress and carbon assimilation in a warming climate: reversible and irreversible impacts [J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 203: 84-94.
- [4] 卢福顺. 水分胁迫对马铃薯生理指标和叶片结构的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
Lu F S. Effect of drought stress on physiological indexes and structure in leaves of potato [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [5] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009, 29(1): 185-212.
- [6] 敬礼恒. 水稻早期抗旱性的鉴定与苗期生理基础的研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
Jing L H. Study on the drought resistance at the early growth stage and researching seedling physiological basis of rice [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [7] 敬礼恒, 刘利成, 梅 坤, 等. 水稻抗旱性能鉴定方法及评价指标研究进展 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(12): 1-5.
Jing L H, Liu L C, Mei K, et al. Research progress of drought resistance identification and evaluation in rice [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(12): 1-5.
- [8] 刘晓纳. 柑橘砧木耐旱性评价及其与根系形态的相关性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
Liu X N. Studing on drought tolerance of rootstock and its correlation with root morphology in citrus [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [9] Xia M Y, Jing M, Jing J, et al. Effect of exogenous application of salicylic acid on the drought stress responses of *Gardenia jasminoides* [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2016, 8(1): 54-64.
- [10] 李海燕, 耿达立, 牛春东, 等. 苹果砧木富平楸子和 G935 根系抗旱性评估 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 118-124.
Li H Y, Geng D L, Niu C D, et al. Drought resistance of root

- system of apple rootstocks *Malus prunifolia* and G935 [J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2018, 46(5): 118-124.
- [11] Jacobsen S E, Monteros C, Corcuera L J, et al. Frost resistance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(4): 471-475.
- [12] 李 阳, 秦智伟, 周秀艳, 等. 黄瓜主要种质资源耐旱性评价 [J]. 北方园艺, 2016(20): 5-8.
- Li Y, Qin Z W, Zhou X Y, et al. Evaluation of drought tolerance in major cucumber germplasm [J]. Northern Horticulture, 2016(20): 5-8.
- [13] 刘丙花. 苹果资源苗期水分利用效率的评价和高效用水的生理机制及其调控研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- Liu B H. Evaluation of water use efficiency and the physiological mechanism and regulation of efficient water use in young apple genetic resources [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2012.
- [14] 马小卫. 苹果属植物种间水分利用效率的差异及其机理研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- Ma X W. Inter-species differences in water use efficiency and its mechanisms in *Malus* [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009.
- [15] 孙小妹. 西瓜抗旱性鉴定指标与方法研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- Sun X M. The study on drought resistance identification methods and indexes of *Citrullus lanatus* [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011.
- [16] 孙 群, 胡景江. 植物生理学研究技术 [M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006.
- Sun Q, Hu J J. Plant physiology research and technology [M]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University Press, 2006.
- [17] Bajji M, Kinet J M, Lutts S. The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat [J]. Plant Growth Regulation, 2002, 36(1): 61-70.
- [18] 高 鹏, 刘遵春, 刘砚璞. 4 个葡萄品种对水分胁迫的响应及其抗旱性评价 [J]. 河南农业科学, 2009(3): 79-81.
- Gao P, Liu Z C, Liu Y P. Response and drought resistance of four grape varieties to water stress [J]. Journal of Henan Agricultural Science, 2009(3): 79-81.
- [19] 谭冬梅. 干旱胁迫对新疆野苹果及平邑甜茶生理生化特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 980-986.
- Tan D M. The physiology and biochemistry of programmed *Malus siversii* and *M. hupehensis* cell death under drought stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 980-986.
- [20] 张庆华, 向发云, 曾祥国, 等. 干旱胁迫下不同品种草莓生理响应及抗旱性评价 [J]. 北方园艺, 2018(2): 30-37.
- Zhang Q H, Xiang F Y, Zeng X G, et al. Physiological response of different strawberry cultivars under drought stress and evaluation of drought resistance [J]. Northern Horticulture, 2018(2): 30-37.
- [21] Gou W, Zheng P, Tian L, et al. Exogenous application of urea and a urease inhibitor improves drought stress tolerance in maize (*Zea mays* L.) [J]. Journal of Plant Research, 2017, 130(3): 599-609.
- [22] Ádám A L, Bestwick C S, Barna B, et al. Enzymes regulating the accumulation of active oxygen species during the hypersensitive reaction of bean to *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* [J]. Planta, 1995, 197(2): 240-249.
- [23] Henrik H, Adams H D, Anderegg W R L, et al. Research frontiers in drought-induced tree mortality: crossing scales and disciplines [J]. New Phytologist, 2015, 205(3): 965-969.
- [24] Sun X, Wang P, Jia X, et al. Improvement of drought tolerance by overexpressing MdATG18a is mediated by modified antioxidant system and activated autophagy in transgenic apple [J]. Plant Biotechnology Journal, 2018, 16(2): 545-557.
- [25] Ying Y Q, Song L L, Jacobs D F, et al. Physiological response to drought stress in *Camptotheca acuminata* seedlings from two provenances [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 1-6.
- [26] Tian Z, Fei W, Zhang W, et al. Antioxidant mechanism and lipid peroxidation patterns in leaves and petals of marigold in response to drought stress [J]. Horticulture Environment & Biotechnology, 2012, 53(3): 183-192.
- [27] 杨佳鑫, 李庆卫, 郭子燕, 等. 3 个梅花品种幼苗耐盐性综合评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 65-74.
- Yang J X, Li Q W, Guo Z Y, et al. Comprehensive evaluation on salt tolerance of three *Prunus mume* varieties [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 65-74.
- [28] Xiang J, Chen X, Wei H, et al. Overexpressing heat-shock protein OsHSP50.2 improves drought tolerance in rice [J]. Plant Cell Reports, 2018, 37(11): 1585-1595.
- [29] Liang G, Bu J, Zhang S, et al. Effects of drought stress on the photosynthetic physiological parameters of *Populus euphratica* “Neva” [J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(2): 409-416.
- [30] 张 静, 赵亮明, 邹志荣. 不同苹果砧木组培苗抗旱性的比较研究 [J]. 果树学报, 2013, 30(1): 88-93.
- Zhang J, Zhao L M, Zou Z R. Drought resistance of different apple rootstocks *in vitro* [J]. The Journal of Fruit Science, 2013, 30(1): 88-93.
- [31] Li C, Tan D X, Liang D, et al. Melatonin mediates the regulation of ABA metabolism, free-radical scavenging, and stomatal behaviour in two *Malus* species under drought stress [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(3): 669-680.
- [32] Zhou S, Li M, Guan Q, et al. Physiological and proteome analysis suggest critical roles for the photosynthetic system for high water-use efficiency under drought stress in *Malus* [J]. Plant Science, 2015, 236: 44-60.
- [33] Hu H, Xiong L. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops [J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65(1): 715-741.