果 树 学 报 2025，42（6）：1148-1161
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20240685

新疆土桃种质实生群体抗旱性表型与生理评价

卢彩红[1]，李 勇[2,3]，吴金龙[2]，徐孟琪[2]，于 巨[2]，朱更瑞[2]，王力荣[2,3]

（[1]塔里木大学园艺与林学学院，新疆阿拉尔 843300；[2]中国农业科学院郑州果树研究所，郑州 450009；
[3]中国农业科学院西部农业研究中心，新疆昌吉 831100）

摘 要：【目的】新疆土桃（以下简称土桃）是中国桃苗木繁育的主要砧木，开展土桃的抗旱性评价，了解其抗性机制和生理特性，对挖掘抗旱种质和培育抗旱砧木品种意义重大。**【方法】**采用聚乙二醇6000（PEG-6000）不同浓度（*w*，后同）（0、15%、25%）的模拟干旱胁迫处理21份种质，其中14份为土桃，以白根甘肃桃1号（*P. kansuensis*）、红根甘肃桃1号（*P. kansuensis*）、山桃3-12（*P. davidiana*）、西康扁桃3号（*P. tangutica*）、西康扁桃4号（*P. tangutica*）、四道岭野生李（*P. salicina*）和榆叶梅1号（*P. triloba*）等7份野生及近缘种质盆栽苗木作为对照，对其进行抗旱表型鉴定，并分析PEG-6000模拟干旱处理对土桃和对照组叶片丙二醛（MDA）与脯氨酸（PRO）含量，以及过氧化物酶（POD）活性等耐旱性生理指标的影响。**【结果】**土桃组比对照品种组平均发芽率（GR）高50.10%，成活率（RS）高8.39%，胚芽长（EL）小18.61%。不同种质干旱胁迫受害指数变异范围为0%~98.75%，可将土桃和对照种质抗旱性分为弱、中等、强3个等级（弱，80＜受害指数≤100；中等，16＜受害指数≤80；强，0≤受害指数≤16），包括抗旱弱种质4份、中等抗旱种质12份、强抗旱种质5份。各种质类型的抗旱性为：山桃抗旱性最强，土桃抗旱性强，但普通桃和油桃无显著差异，甘肃桃中等，西康扁桃、中国李和榆叶梅的抗性低。通过对抗旱性和生理指标MDA、PRO和POD的相关性分析得出，抗旱性与MDA和PRO呈正相关，与POD呈负相关，随着PEG-6000浓度的增加，各品种叶片丙二醛（MDA）的含量、游离脯氨酸（PRO）的含量和POD活性存在显著差异，其中丙二醛（MDA）含量和游离脯氨酸（PRO）含量整体上呈上升趋势，POD的活性呈先上升后下降的趋势。**【结论】**筛选出耐旱性优异种质4份，可为后续进一步挖掘新疆土桃抗旱基因及抗旱品种的选育提供理论基础。

关键词：新疆土桃；干旱胁迫；种质评价；生理特性

中图分类号：S662.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1009-9980(2025)06-1148-14

Phenotypic and physiological evaluation of drought resistance in seedling populations of Xinjiang native peach germplasm

LU Caihong[1], LI Yong[2,3], WU Jinlong[2], XU Mengqi[2], YU Ju[2], ZHU Gengrui[2], WANG Lirong[2,3]

([1]College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China; [2]Zhengzhou Fruit Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450009, Henan, China; [3]Western Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】The Xinjiang native peach, referred to as Tutao, serves as the primary rootstock for seedling breeding in China. Evaluating the drought tolerance of these native varieties is crucial for understanding their resistance mechanisms and physiological traits, which can aid in enhancing selection of drought-resistant germplasm and rootstock varieties.【Methods】In this study, 21 germplasm accessions were subjected to simulated drought stress using varying concentrations of polyethylene glycol 6000 (PEG-6000) at 0%, 15%, and 25%, with 14 of these being Tutao. The seven potted wild and related germplasm seedlings with drought-resistant phenotypes including Baigen Gansutao No. 1, Honggen Gansutao No. 1 (*Prunus kansuensis*), Shantao 3-12 (*P. davidiana*), Xikang Biantao No. 3 (*P. dulcis*), Xi-

收稿日期：2025-01-08 **接受日期：**2025-03-07

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YEE0105400）；中国农业科学院科技创新工程项目（西部特色中心林果提质增效团队）；国家重点研发计划课题（2021YFD1200202）

作者简介：卢彩红，女，在读硕士研究生，研究方向为桃种质资源与遗传育种。E-mail：3181481608@qq.com

***通信作者** Author for correspondence. Tel：0371-55906989，E-mail：wanglirong@caas.cn

kang Biantao No. 4 (*P. dulcis*), Sidaoling wild plum (*P. salicina*), and Yuyemei No. 1 (*P. triloba*), were used as controls. In the study, the effects of PEG-6000 were analyzed on malondialdehyde (MDA) and proline (PRO) levels, as well as peroxidase (POD) activity in the leaves of both peach and control groups.【Results】Results indicated that the Tutao group demonstrated a 50.10% higher germination rate, a 8.39% higher survival rate, and a 18.61% shorter germ length compared to the control group. Different seed sources would affect various germination indexes of seeds, which were closely related to drought resistance. The germination rate of Tutao was higher than that of other mainland varieties, indicating better seed fullness. The variation of drought stress damage index of different germplasm accessions ranged from 0 to 98.75%. The drought resistance of Tutao and control germplasm could be divided into three grades: Weak (>80), Moderate (16−80), Strong (≤16). The results showed that there were 4 weak-drought-resistant germplasm accessions, 12 medium drought-resistant germplasm accessions and 5 strong-drought-resistant germplasm accessions. The five accessions with strong resistance were Shandao 3-12, Kunyu Youtao No. 1, Shache Bai Youtao No. 1, Shache Nuroutao No. 5, and Ruoqiang Nuroutao No. 1. The drought resistance levels among different quality types were as follows: Shandao demonstrated the highest drought resistance, Tutao had strong drought resistance, which also showed strong resistance. However, there was no significant difference in drought resistance between common peach and nectarine. In contrast, Gansutao exhibited medium resistance, while Xikang Biantao, Sidaolin wild plum, and Yuyemei showed low resistance. Based on the correlation analysis between drought resistance and the physiological indexes of MDA, PRO, and POD, it was determined that the drought resistance was positively correlated with MDA and PRO, while it had a negative correlation with POD. Therefore, germplasm accessions corresponding to its trend were selected for physiological index analysis. It was found that the contents of malondialdehyde (MDA) and free proline (PRO), and the activity of peroxidase (POD) in leaves of all varieties had significant differences with the increase of PEG-6000 concentration, and the contents of malondialdehyde (MDA) and free proline (PRO) showed an overall upward trend. The peroxidase (POD) activity increased firstly and then decreased, and the physiological changes of Tutao were basically consistent with its drought resistance phenotype. The leaf drought damage of Xinjiang Tutao peach and control varieties was positively correlated with MDA and PRO contents, and negatively correlated with POD activity. MDA and PRO contents were positively correlated with each other ($p<0.05$), and PRO content and POD activity were significantly and positively correlated with each other ($p<0.01$). Progressive drought stress triggered significant accumulation of leaf proline to reduce the effect of drought stress. When the drought stress was mild, the activity of peroxidase in leaves increased to reduce the oxidative damage. However, the activity of oxidase decreased significantly when the drought stress intensified. The more drought-resistant varieties showed better physiological response, excellent ability to adapt to drought conditions, and to enhance the drought resistance of plants. The higher the antioxidant capacity of varieties, the stronger the drought resistance.【Conclusion】The results showed that: Firstly, the germination rate of the native peach germplasm was 50.11% higher than that of the control variety, which could be used as a high-quality material for rootstocks; Secondly, the drought resistance of Tutao was stronger, and the tolerance to drought stress was higher; Finally, the selection of 4 excellent drought tolerance germplasm accessions provided a theoretical basis for further exploration of drought tolerance genes and breeding of drought-resistant varieties in Xinjiang native peaches.

Key words: Xinjiang native peach; Drought stress; Germplasm evaluation; Physiological characteristics

干旱胁迫是指水分不足导致的植物正常代谢和生理功能紊乱，植物会对干旱胁迫产生一定的表型和生理响应。干旱对农作物造成严重的损失，是限制世界作物生产的主要环境因子之一。新疆由于地处内陆，远离海洋，属于典型的非季风区，年平均降水量仅148.1 mm，气候干旱，是中国最大的旱区，干旱是限制新疆果树产业发展的主要因素之一。

桃产业是新疆林果产业的重要组成部分，新疆土桃主要在南疆，阿克苏、喀什、和田地区为主要产区[1-2]。南疆是中国桃种质资源多样性中心，种质资源丰富，新疆土桃（以下简称“土桃”）主要包含桃（*Prunus persica* L.）和新疆桃[*P. ferganensis*（Kost. amp；Rjab.）S.L.Z]两个植物学种。土桃果实描述型性状变异类型丰富，数量型性状变异系数高[3]。土桃除用作鲜食生产外，也是中国桃、李、杏、扁桃等核果类树种砧木的主要来源，但目前缺乏对土桃抗旱性的系统评价和抗旱砧木的选择。

笔者课题组前期已经对土桃的遗传多样性和土桃的同名异物品种进行了SSR荧光标记等方面的研究[4-5]。植物的抗氧化酶系统过氧化物酶（POD）在胁迫条件下可以通过降低细胞活性氧的含量，避免植物受氧化胁迫，从而保持细胞膜的完整度[6]。游离脯氨酸（PRO）是一种渗透调节物质，在抵御干旱胁迫方面起到重要作用，其在植物体内（PRO）含量是衡量植物受到干旱胁迫影响大小的重要指标[7]。MAD是膜脂过氧化的产物，其含量高低反映了膜脂过氧化的程度，并被广泛地用作评价植物在遭受干旱时的特性参数[8]。

为系统评价新疆土桃种质抗旱性，为抗旱砧木育种提供参考。笔者在本研究中主要以14份新疆土桃种质资源为材料，以山桃、甘肃桃、西康扁桃、四道岭野生李、榆叶梅等常作为桃砧木的李属资源对照，采取不同浓度的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫，在种质资源沙藏期间，对各萌发指标及幼苗期表型进行田间调查，并开展抗性评价，明确干旱胁迫对其生理指标的影响，筛选耐旱土桃资源，为后续进一步挖掘新疆土桃抗旱基因及抗旱品种的选育提供种质材料和理论参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试种质详细信息见表1[5]。

聚乙二醇（PEG-6000）购自天津市科密欧化学试剂有限公司；丙二醛（MDA）含量试剂盒、脯氨酸

表1 供试21份种质资源信息

Table 1 The germplasm resources of 21 samples were tested

编号 Number	种子采集地点 Seed collection sites	资源名称 Resource name	植物学名称 Botanical name	种质类型 Germplasm type
P1	新疆英吉沙 Yingjisha of Xinjiang	英吉沙白肉1号 Yinjisha Bairou No. 1	*P. persica*	普通桃 Peach
P2	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车白肉8号 Shache Bairou No. 8	*P. persica*	普通桃 Peach
P3	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车白肉12号 Shache Bairou No. 12	*P. persica*	普通桃 Peach
P4	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车白油桃1号 Shache Baiyoutao No. 1	*P. persica*	油桃 Nectarine
P5	河南新乡 Xinxiang of Henan	阿图什油桃2号 Atushi Youtao No. 2	*P. persica*	油桃 Nectarine
P6	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车黄油桃2号 Shache Huangyoutao No. 2	*P. persica*	油桃 Nectarine
P7	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车黄油桃9号 Shache Huangyoutao No. 9	*P. persica*	油桃 Nectarine
P8	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车绿肉3号 Shache Lürou No. 3	*P. ferganensis*	普通桃 Peach
P9	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车绿肉5号 Shache Lürou No. 5	*P. ferganensis*	普通桃 Peach
P10	新疆若羌 Ruoqiang of Xinjiang	若羌绿肉1号 Ruoqiang Lürou No. 1	*P. ferganensis*	普通桃 Peach
P11	新疆英吉沙 Yingjisha of Xinjiang	英吉沙黄肉1号 Yinjisha Huangrou No. 1	*P. ferganensis*	普通桃 Peach

表1 （续） Table 1 (Continued)

编号 Number	种子采集地点 Seed collection sites	资源名称 Resource name	植物学名称 Botanical name	种质类型 Germplasm type
P12	新疆莎车 Shache of Xinjiang	莎车绿肉2号 Shache Lürou No. 2	*P. ferganensis*	普通桃 Peach
P13	新疆和田 Hotian of Xinjiang	皮山绿肉5号 Pishan Lürou No. 5	*P. ferganensis*	普通桃 Peach
P14	新疆昆玉 Kunyu of Xinjiang	昆玉油桃1号 Kunyu Youtao No. 1	*P. ferganensis*	油桃 Nectarine
P15	河南郑州 Zhengzhou of Henan	西康扁桃3号 Xikang Biantao No. 3	*P. tangutica*	野生扁桃 Wild Almond
P16	河南郑州 Zhengzhou of Henan	西康扁桃4号 Xikang Biantao No. 4	*P. tangutica*	野生扁桃 Wild Almond
P17	河南郑州 Zhengzhou of Henan	山桃3-12 Shantao 3-12	*P. davidiana*	桃野生种质 Wild peach
P18	河南郑州 Zhengzhou of Henan	四道岭野生李 Sidaoling wild plum	*P. salicina*	中国李 Plum
P19	河南郑州 Zhengzhou of Henan	榆叶梅1号 Yuyemei No. 1	*P. triloba*	野生扁桃 Wild Almond
P20	河南郑州 Zhengzhou of Henan	白根甘肃桃1号 Baigen Gansutao No. 1	*P. kansuensis*	桃野生种质 Wild peach
P21	河南郑州 Zhengzhou of Henan	红根甘肃桃1号 Honggen Gansutao No. 1	*P. kansuensis*	桃野生种质 Wild peach

（PRO）含量试剂盒、过氧化物酶（POD）活性试剂盒，均购自江苏艾迪生生物科技有限公司。

1.2 试验方法

试验于2023年11月7—8日开始层积，冷库条件为-4 ℃和湿度为94%~96%，每份种质120粒。进行沙藏试验，打破休眠。具体步骤如下：在盒子中铺一层1~1.5 cm厚的蛭石，铺平后摆放一层种子。摆放一层后，撒一层蛭石覆盖住种子，铺平后继续摆放下层种子，以此类推。最后，在盒子表面盖上一层保鲜膜，盖上盒盖，存放于冷库保存，每隔7 d调查种子低温层积发芽的情况。育苗试验在中国农业科学院郑州果树研究所温室内进行，于2024年2月28日，在32孔58 cm×24 cm×7 cm育苗盘中播种育苗，花盆内腐殖土与蛭石体积比为1∶1，同期，调查幼苗的成活率。2024年4月初幼苗生长至高度为20~30 cm时开始进行抗旱试验，前期设计5个浓度梯度进行了预试验处理，通过预试验发现，在15%和25%浓度处理幼苗叶片变化明显，正式试验设计3个处理，分别设15%、25%以及正常浇水为空白对照（CK，以纯化水配制的霍格兰营养液），对苗期的21份种质材料根部进行灌根处理，每个处理16株，每株浇灌50 mL的PEG-6000[9]，在各株土壤墒情一致的情况下，3次重复，在干旱胁迫处理后，观察记录幼苗叶片的失水和萎蔫情况，进行抗旱性综合评价，并在胁迫后7 d分别采集不同处理的种质材料根部数起第3枚叶子后的叶片，将样本用液氮保存后放置于-80 ℃冰箱中，测定21份种质材料的叶片丙二醛（MDA）含量与脯氨酸（PRO）含量，以及过氧化物酶（POD）活性等相关耐旱性生理指标。

1.3 试验内容

1.3.1 萌发指标和成活率的测定　测定指标的计算公式为发芽率/%=14 d发芽的种子数/总种子数×100[10]，

发芽势/%=5 d发芽种子数/总种子×100[10]，

发芽指数（GI）=∑Gt/Dt[10]，

式中：Gt为第t天的发芽数，Dt为相应的发芽天数。

活力指数（VI）=GI×S[11]，

式中：GI为发芽指数，S为幼苗鲜质量，从2024年2月初至2月末，用游标卡尺测量发芽种子的胚根长和胚芽长，用电子天平称量种子的百粒质量。

1.3.2 实生群体抗性评价　根据干旱处理10 d时的植株受害症状，以株为单位确定其受害等级和抗性。干旱受害等级划分与个体抗性评价标准参考曲艳华等[12]对野生新疆桃酸碱盐的评价标准（表2）。

根据处理结束时种质实生苗的个体受害等级，计算受害指数，据此评价其群体抗旱性。

受害指数/%=∑（受害级数×相应等级株数）/最

表2 种质旱害等级与个体抗性划分标准

Table 2 Classification criteria of drought damage and individual resistance of native peach in Xinjiang

受害等级 Injury grade	症状 Symptom	抗性 Resistance
1级 Grade 1	0~1/3的叶片出现叶尖、叶缘萎蔫或褐化干枯。0-1/3 of the leaves were withered or browned and dried.	极强 Extremely strong
2级 Grade 2	1/3~1/2的叶片叶尖、叶缘萎蔫或褐化干枯。1/3~1/2 of the leaf tip, leaf edge wilt or brown dry.	强 Strong
3级 Grade 3	1/2~2/3的叶片叶尖、叶缘萎蔫或褐化干枯，叶片焦枯面积扩大，一半叶片脱落。1/2~2/3 of the leaf tips and leaf edges wilted or browned and dried, the scorched area of the leaves expanded, and half of the leaves fell off.	中等 Medium
4级 Grade 4	所有叶片的叶片叶尖、叶缘萎蔫或褐化干枯，至所有叶片焦枯或脱落，苗茎基部尚未干枯。The tips and edges of all leaves are wilted or browned and dried until all leaves are scorched or fall off, and the base of the seedling stem is not dried.	弱 Weak
5级 Grade 5	整株枯死。The whole plant died.	极弱 Extremely weak

高受害指数×总株数×100，抗性评价标准，根据受害指数将种质材料抗旱性分为3个等级：强，0≤受害指数≤16；中等，16＜受害指数≤80；弱，80＜受害指数≤100。

变异系数：CV=sd/mn，

式中：sd为标准差，mn为平均值。变异系数表示某一性状的离散程度。

1.3.3 生理指标的测定 （1）丙二醛（MDA）含量：使用硫代巴比妥酸法（TBA）测定[13]；（2）脯氨酸（PRO）含量：使用茚三酮法测定[13]；（3）过氧化物酶（POD）活性：使用愈创木酚显色法测定[14]。

1.4 数据处理

采用Excel2016对试验数据进行系统的整理和图表绘制，运用SPSS进行单因素及相关性分析，采用Origin作图。

2 结果与分析

2.1 调查种子的萌发指标

由表3可知，皮山绿肉5号干质量最大，为546.00 g，在相同沙藏条件下，21份种质资源的各类萌发指标存在显著差异（p＜0.05）。山桃3-12的胚根长明显高于其他品种，为88.80 mm，是抗旱性的表现；西康扁桃4号的胚芽长最长，为50.08 mm，是种子需要的春化时间短的缘故；发芽率高的是皮山绿肉5号，显著高于其他品种（p＜0.05），为100.00%，发芽率低的是西康扁桃3号和西康扁桃4号，显著低于其他品种（p＜0.05），分别为19.10%和18.10%；莎车白肉12号的发芽势最高，显著高于其他品种（p＜0.05），为95.60%，莎车白肉8号和若羌绿肉1号发芽势相同为8.30%；发芽指数最高的为莎车白肉12号，为19.12；活力指数最高的是皮山绿肉5号，为19.95，与莎车白肉12号和西康扁桃3号无显著差异。

由表4可知，新疆桃的桃核干质量最大且显著高于其他品种（p＜0.05），为341.00 g；西康扁桃的发芽率和成活率最低，分别为18.6%和71.95%，新疆桃和普通桃的发芽率最高，分别为90.19%和96.34%，成活率差异不显著，分别为99.04%和99.24%，榆叶梅成活率为100.00%；山桃的胚根长最长，为88.80 mm；榆叶梅的胚芽长最长，为46.24 mm，新疆桃和普通桃胚芽长差异不显著，分别是18.95 mm和18.48 mm。由此得出，种子的来源地不同，会影响种子的各种萌发指标，土桃的萌发率较其他内地品种较高，说明其种子饱满程度更高。

2.2 抗旱性表型评价

通过PEG-6000模拟干旱胁迫14份新疆土桃和7份对照种质实生苗群体，对照组CK、15%和25% 3个处理各16株，处理第7天，对照组并未出现植株叶尖、叶缘失水萎蔫的现象，相反，在15%和25%浓度的PEG处理下，21个品种的叶尖和叶缘都表现出不同程度的失水和萎蔫现象（图1）。

由表5可知，在15%浓度的PEG处理下，西康扁桃4号、阿图什油桃2号、四道岭野生李、英吉沙黄肉1号、榆叶梅1号和莎车白肉12号的叶尖和叶缘出现了中度的失水和萎蔫现象，抗旱等级中等，受害指数分别为75%、65.62%、52.5%、50%、40%和34.37%；其余15份试验材料表现为强的抗旱性，只有莎车黄油桃9号和白根甘肃桃1号的叶尖和叶缘出现了轻微的失水和萎蔫现象，受害指数为0.19%和0.06%；研究结果显示在15%浓度的PEG处理下，西康扁桃

表3　相同沙藏条件下21份种质资源的种子萌发指标比较

Table 3　Comparison of seed germination indexes of 21 germplasm resources under the same sand storage conditions

编号 Number	资源名称 Resource name	干质量 Dry mass/g	胚根长 Radicle length/mm	胚芽长 Embryo length/mm	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination energy/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Visual index	成活率 Survival rate/%
P1	英吉沙白肉1号 Yingjisha Bairou No. 1	278 bc	52.89 bc	20.86 bc	95.00 c	25.00 cd	5.00 c	4.15 c	100.00 a
P2	莎车白肉8号 Shache Baigrou No. 8	302 b	46.86 bc	10.95 d	97.50 a	8.30 de	1.66 e	1.25 e	97.40 a
P3	莎车白肉12号 Shache Bairou No. 12	183 c	25.10 d	25.94 bc	98.20 a	95.60 a	19.12 a	15.10 a	100.00 a
P4	莎车白油桃1号 Shache Bairou No. 1	276 bc	64.10 b	12.39 d	98.00 a	50.00 bc	10.00 b	6.90 bc	100.00 a
P5	阿图什油桃2号 Atushi Youtao No. 2	228 bc	57.80 bc	16.92 bc	96.70 a	58.30 bc	11.66 a	8.39 b	100.00 a
P6	莎车黄油桃2号 Shache Huangyoutao No. 2	236 bc	80.10 a	26.61 bc	97.30 a	36.40 c	7.28 bc	6.12 bc	100.00 a
P7	莎车黄油桃9号 Shache Huangyoutao No. 9	224 bc	47.53 bc	15.67 bc	91.70 a	33.00 c	6.60b c	4.69 c	97.30 a
P8	莎车绿肉3号 Shache Lürou No. 3	339 b	43.60 c	13.91 cd	97.50 a	20.00 de	4.00 d	2.56 d	100.00 a
P9	莎车绿肉5号 Shache Lürou No. 5	188 c	58.40 bc	23.18 bc	76.70 b	67.00 b	13.40 a	8.57 b	100.00 a
P10	若羌绿肉1号 Ruoqing Lürou No. 1	378 b	49.60 bc	14.85 cd	88.35 b	8.30 de	1.66 e	1.06 e	100.00 a
P11	英吉沙黄肉1号 Yingjisha Huangrou No. 1	323 b	49.79 bc	25.68 bc	90.00 d	50.00 bc	10.00 b	7.90 bc	95.00 a
P12	莎车绿肉2号 Shache Lürou No. 2	335 b	85.70 a	22.31 bc	96.00 a	36.00 c	7.20 bc	6.20 bc	98.30 a
P13	皮山绿肉5号 Pishan Lürou No. 5	546 a	82.70 a	20.30 bc	100.00 a	76.20 b	15.24 a	19.95 a	100.00 a
P14	昆玉油桃1号 Kunyu Youtao No. 1	276 bc	49.60 bc	12.39 d	82.80 b	56.20 bc	11.24 b	7.19 bc	100.00 a
P15	西康扁桃3号 Xikang Biantao No. 3	161 c	29.44 c	35.85 b	19.10 de	67.00 b	13.40 a	18.76 a	70.00 b
P16	西康扁桃4号 Xikang Biantao No. 4	76 d	71.20 a	50.08 a	18.10 de	36.00 cd	7.20 bc	9.29 b	73.90 b
P17	山桃3-12 Shantao 3-12	177 c	88.80 a	32.99 b	60.00 b	42.00 c	8.40 b	10.75 b	98.60 a
P18	四道岭野生李 Sidaoling wild plum	43 d	52.98 bc	42.05 a	36.60 d	51.00 bc	10.20 a	6.53 bc	94.30 a
P19	榆叶梅1号 Yuyemei No. 1	47 d	85.50 a	46.24 a	36.90 d	31.00 cd	6.20 bc	3.60 d	100.00 a
P20	白根甘肃桃1号 Baigen Gansutao No. 1	184 c	41.66 bc	25.48 bc	72.45 b	76.00 b	15.20 a	9.43 b	98.50 a
P21	红根甘肃桃1号 Honggen Gansutao No. 1	225 bc	44.42 bc	28.55 bc	59.00 c	48.00 c	9.60 b	7.09 bc	100.00 a

注：P1-P21 代表 21 份种质编号；种质同列不同字母表示相同沙藏条件下的差异显著性（$p<0.05$）。下同。

Note: P1-P21 represents various quality numbers; Different letters in the same column indicate the difference significance under the same sand deposit condition ($p<0.05$). The same below.

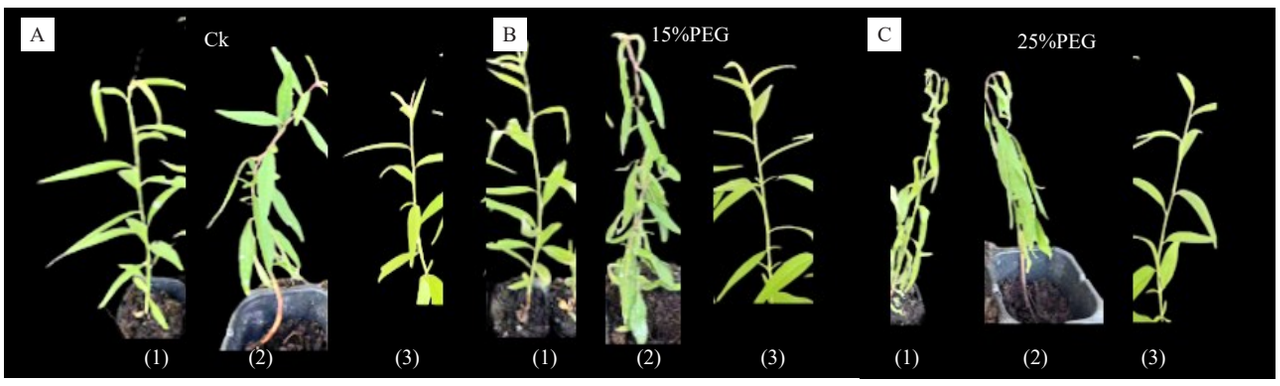
4号、阿图什油桃2号、四道岭野生李、英吉沙黄肉1号、榆叶梅1号、莎车白肉12号和莎车黄油桃9号耐旱性较弱。

由表6可知，在25%浓度的PEG-6000处理下，5个品种的叶尖和叶缘未出现失水和萎蔫现象，说明5个品种的抗旱性相较其他品种要强，分别是：昆玉油桃1号、莎车白油桃1号、莎车绿肉5号、若羌绿肉1号和山桃3-12；其余的16份材料的叶尖和叶缘都出现了不同程度的失水和萎蔫的现象，4份材料抗旱等级弱，12份材料抗旱等级中等。其中，阿图什

表4 不同种质类型在相同沙藏条件下的种子萌发特性比较

Table 4 Comparison of seed germination characteristics of different germplasm types under the same sand storage conditions

种质类型 Germplasm type	种质份数 Germplasm number	干质量 Dry mass/g	胚根长 Radicle length/mm	胚芽长 Embryo length/mm	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination energy/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Visual index	成活率 Survival rate/%
山桃 *Prunus davidiana*	1	177 c	88.80 a	32.99 b	60.00 b	42.00 c	8.40 c	10.75 b	98.60 a
新疆桃 *Prunus ferganensis*	7	341 a	59.91 b	18.95 d	90.19 a	44.81 c	8.96 c	7.63 c	99.04 a
甘肃桃 *Prunus kansuensis*	2	205 b	43.04 c	27.02 c	65.73 b	62.00 a	12.40 a	8.26 c	99.25 a
普通桃 *Prunus persica*	7	247 b	53.48 b	18.48 d	96.34 a	43.80 c	8.76 c	6.66 c	99.24 a
中国李 *Prunus salicina*	1	43 d	52.98 b	42.05 a	36.60 c	51.00 b	10.20 b	6.53 c	94.30 a
西康扁桃 *Prunus tangutica*	2	119 c	50.32 b	42.97 a	18.60 d	51.50 b	10.30 b	14.03 a	71.95 b
榆叶梅 *Prunus triloba*	1	47 d	85.50 a	46.24 a	36.90 c	31.00 d	6.20 d	3.60 d	100.00 a



A、B、C 图(1)(2)(3)分别为阿图什油桃 2 号、西康扁桃 4 号和莎车白肉 12 号在 CK、15%和 25%浓度处理下的表型。

Figures (1), (2) and (3) of A, B and C showed the phenotypes of Atushi Youtao No. 2, Xikang Biantao No. 4 and Shache Bai rou No. 12 under CK, 15% and 25% concentration treatment, respectively.

图1 不同浓度干旱胁迫下3份种质的表型变化情况

Fig. 1 Phenotypic changes of 3 germplasm under different concentrations of drought stress

油桃2号、莎车绿肉3号、莎车黄油桃9号和西康扁桃4号的抗旱等级弱，受害指数高，受害指数分别为98.75%、92.50%、85.00%和85.00%，莎车黄油桃9号和西康扁桃4号的受害指数相同；榆叶梅1号、莎车黄油桃2号、英吉沙黄肉1号、四道岭野生李、莎车白肉8号、西康扁桃3号、红根甘肃桃1号、白根甘肃桃1号、英吉沙白肉1号、莎车绿肉2号、皮山绿肉5号和莎车白肉12号抗旱等级中等，受害指数分别是77.50%、70.00%、66.25%、60.00%、58.75%、50.00%、41.67%、41.25%、25.00%、18.75%、16.67%和12.50%，得出结论：在25%浓度的PEG-6000处理下，幼苗的正常生长受到了极大的影响。

由表7可知，各种质类型整体的抗旱趋势为山桃＞新疆桃＞甘肃桃＞普通桃＞中国李＞西康扁桃＞榆叶梅；其中土桃中，新疆桃和普通桃中的个体差异大，挖掘的潜在可能性大。

2.3 干旱胁迫下新疆土桃和对照品种叶片耐旱性和各项生理指标的相关性

由图2可知，干旱胁迫下对新疆土桃和对照品种叶片各项耐旱性生理指标的相关性分析显示，新疆土桃和对照品种叶片受旱害情况与MDA含量和PRO含量呈正相关，与POD活性呈负相关，MDA含量与PRO含量呈极显著正相关（$p<0.05$），PRO含量与POD活性呈显著正相关（$p<0.01$）。分析结果表明，当干旱胁迫浓度增加时，各叶片受到氧化胁迫加剧，随着干旱

表5　15%浓度的PEG干旱胁迫下新疆土桃和对照品种的抗旱性

Table 5　Drought resistance of native peach and control varieties in Xinjiang under drought stress with 15% PEG concentration

编号 Number	品种 Variety	处理株数 Processing plant	受害指数 Injury index/%	抗性 Resistance
P16	西康扁桃4号 Xikang Biantao No. 4	16	75.00	中等 Medium
P5	阿图什油桃2号 Atushi Youtao No. 2	16	65.62	中等 Medium
P18	四道岭野生李 Sidaoling wild plum	16	52.50	中等 Medium
P11	英吉沙黄肉1号 Yinjisha Huangrou No. 1	16	50.00	中等 Medium
P19	榆叶梅1号 Yuyemei No. 1	16	40.00	中等 Medium
P2	莎车白肉8号 Shache Bairou No. 8	16	34.37	中等 Medium
P7	莎车黄油桃9号 Shache Huangyoutao No. 9	16	0.19	强 Strong
P20	白根甘肃桃1号 Baigen Gansutao No. 1	16	0.06	强 Strong
P8	莎车绿肉3号 Shache Lürou No. 3	16	0.00	强 Strong
P6	莎车黄油桃2号 Shache Huangyoutao No. 2	16	0.00	强 Strong
P15	西康扁桃3号 Xikang Biantao No. 3	16	0.00	强 Strong
P21	红根甘肃桃1号 Honggen Gansutao No. 1	16	0.00	强 Strong
P1	英吉沙白肉1号 Yinjisha Bairou No. 1	16	0.00	强 Strong
P12	莎车绿肉2号 Shache Lürou No. 2	16	0.00	强 Strong
P13	皮山绿肉5号 Pishan Lürou No. 5	16	0.00	强 Strong
P3	莎车白肉12号 Shache Bairou No. 12	16	0.00	强 Strong
P14	昆玉油桃1号 Kunyu Youtao No. 1	16	0.00	强 Strong
P4	莎车白油桃1号 Shache Baiyoutao No. 1	16	0.00	强 Strong
P9	莎车绿肉5号 Shache Lürou No. 5	16	0.00	强 Strong
P10	若羌绿肉1号 Ruoqiang Lürou No. 1	16	0.00	强 Strong
P17	山桃3-12 Shantao 3-12	16	0.00	强 Strong

注：P1-P21 代表 21 份种质的编号；16 株苗每一株为一个独立的样本数。下同。

Note: P1-P21 represents various quality numbers; Each of the 16 seedlings is an independent sample number. The same below.

表6　25%浓度的PEG干旱胁迫下新疆土桃和对照品种的抗旱性

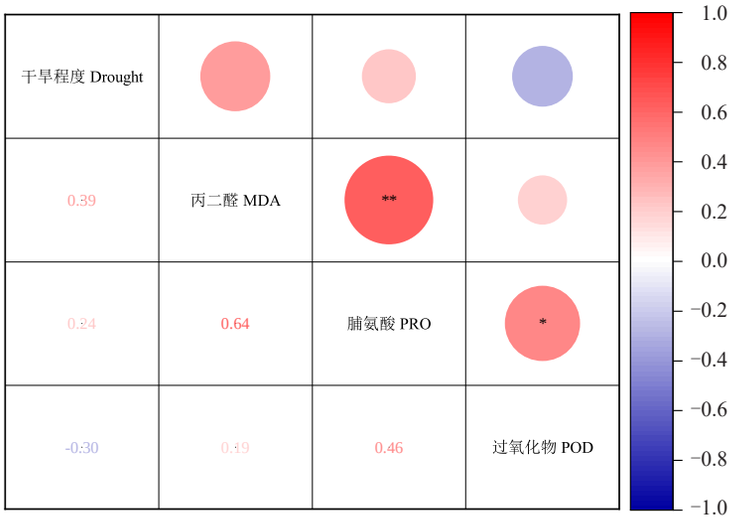
Table 6　Drought resistance of native peach and control varieties in Xinjiang under drought stress with 25% PEG concentration

编号 Number	品种 Variety	处理株数 Processing plant	受害指数 Injury index/%	抗性 Resistance
P5	阿图什油桃2号 Atushi Youtao No. 2	16	98.75	弱 Weak
P8	莎车绿肉3号 Shache Lürou No. 3	16	92.50	弱 Weak
P7	莎车黄油桃9号 Shache Huangyoutao No. 9	16	85.00	弱 Weak
P16	西康扁桃4号 Xikang Biantao No. 4	16	85.00	弱 Weak
P19	榆叶梅1号 Yuyemei No. 1	16	77.50	中等 Medium
P6	莎车黄油桃2号 Shache Huangyoutao No. 2	16	70.00	中等 Medium
P11	英吉沙黄肉1号 Yinjisha Huangrou No. 1	16	66.25	中等 Medium
P18	四道岭野生李 Sidaoling wild plum	16	60.00	中等 Medium
P2	莎车白肉8号 Shache Bairou No. 8	16	58.75	中等 Medium
P15	西康扁桃3号 Xikang Biantao No. 3	16	50.00	中等 Medium
P21	红根甘肃桃1号 Honggen Gansutao No. 1	16	41.67	中等 Medium
P20	白根甘肃桃1号 Baigen Gansutao No. 1	16	41.25	中等 Medium
P1	英吉沙白肉1号 Yinjisha Bairou No. 1	16	25.00	中等 Medium
P12	莎车绿肉2号 Shache Lürou No. 2	16	18.75	中等 Medium
P13	皮山绿肉5号 Pishan Lürou No. 5	16	16.67	中等 Medium
P3	莎车白肉12号 Shache Bairou No. 12	16	12.50	中等 Medium
P14	昆玉油桃1号 Kunyu Youtao No. 1	16	0.00	强 Strong
P4	莎车白油桃1号 Shache Baiyoutao No. 1	16	0.00	强 Strong
P9	莎车绿肉5号 Shache Lürou No. 5	16	0.00	强 Strong
P10	若羌绿肉1号 Ruoqiang Lürou No. 1	16	0.00	强 Strong
P17	山桃3-12 Shantao 3-12	16	0.00	强 Strong

表7 不同种质类型的抗旱性变异程度

Table 7 Variation degree of drought resistance in different germplasm types

编号 Number	种质类型 Germplasm type	种质份数 Germplasm number	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 *CV*/%
1	山桃 *Prunus davidiana*	1	0.00	0.00	0.00
2	新疆桃 *Prunus ferganensis*	7	27.73	34.25	123.51
3	甘肃桃 *Prunus kansuensis*	2	41.46	0.00	0.00
4	普通桃 *Prunus persica*	7	50.00	37.88	75.76
5	中国李 *Prunus salicina*	1	60.00	0.00	0.00
6	西康扁桃 *Prunus tangutica*	2	67.20	24.75	36.83
7	榆叶梅 *Prunus triloba*	1	77.50	0.00	0.00



*. 在 $p<0.05$ 水平差异显著；**. 在 $p<0.01$ 水平差异极显著。

*. Significant difference at the level of $p < 0.05$；**. Significant extremely difference at the level of $p<0.01$.

图2 干旱胁迫下新疆土桃和对照品种叶片耐旱性与各项生理指标的相关性

Fig. 2 Correlation of leaf drought tolerance and physiological indexes of Xinjiang native peach and control varieties under drought stress

程度的加深，叶片内PRO含量显著增加，以减轻干旱胁迫的影响，干旱胁迫较轻时，叶片POD活性呈上升趋势，以减轻氧化损伤；POD活性与MDA和PRO的变化趋势相反为显著下降趋势，与柳政戎等[15]和李亚娇等[16]研究结果一致，可以用这些指标来衡量土桃的抗旱性。

2.4 干旱胁迫对新疆土桃叶片丙二醛(MDA)含量的影响

由图3可知，随着干旱胁迫PEG-6000浓度的增加，新疆土桃叶片MDA含量呈上升的趋势，相同浓度不同品种之间存在显著差异($p<0.05$)，相同品种不同浓度梯度也存在显著差异($p<0.05$)，越是抗旱的品种，其MDA的含量越高。在对照组中，莎车绿肉3号叶片的MDA含量(b)显著低于其他品种($p<0.05$)，为22.80 nmol·g^{-1}，比莎车黄肉9号低5.05%，莎车绿肉5号和若羌绿肉1号差异不显著($p>0.01$)；干旱胁迫浓度为15%时，各叶片的MDA含量变化幅度较小，若羌绿肉1号MDA含量最高且显著高于其他品种，为42.75 nmol·g^{-1}，比莎车绿肉5号高11.18%，莎车绿肉3号和莎车黄油桃9号差异不显著($p>0.01$)；干旱胁迫浓度为25%时，各叶片的MDA含量呈快速上升趋势，莎车绿肉3号显著低于其他品种，比莎车黄肉9号低4.65%，若羌绿肉1号显著高于其他品种，比莎车绿肉5号高8.76%；3个浓度处理下：莎车绿肉3号、莎车黄油桃9号、莎车黄肉2号和英吉沙黄肉1号叶片MDA含量的变化趋势不明显，其余4个品种叶片MDA含量显著增加($p<0.05$)，结果表明：越是抗旱的品种，在受到干旱胁迫时，能更好地表现出生理响应，具备适应干旱条件的能力，增强植物的抗旱能力。

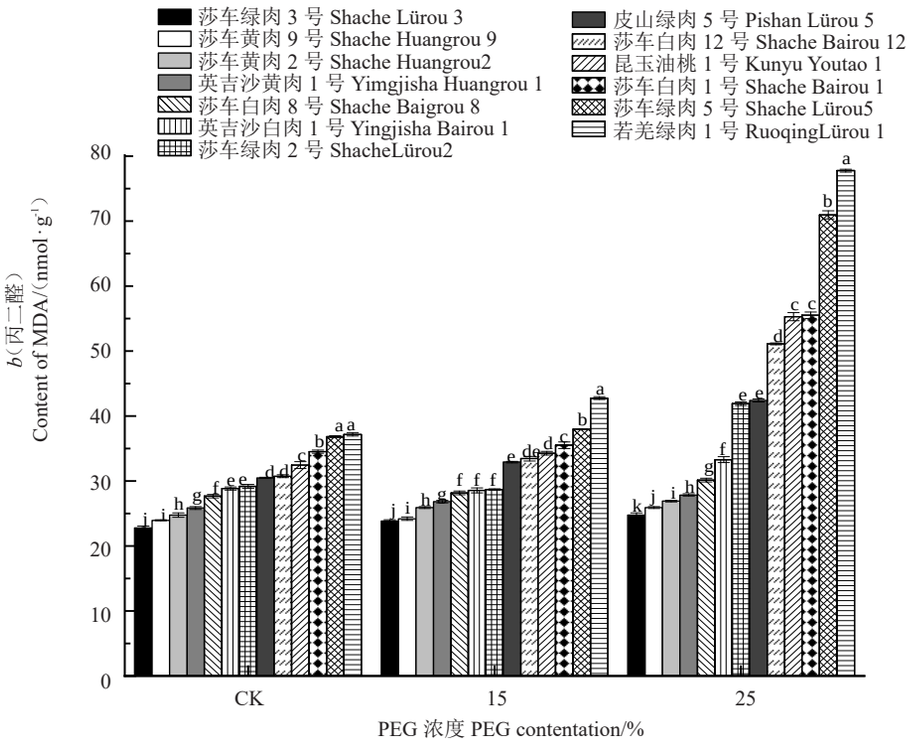


图 3　干旱胁迫对新疆土桃叶片丙二醛（MDA）含量的影响

Fig. 3　Effects of drought stress on the content of malondialdehyde (MDA) in leaves of native peach in Xinjiang

2.5　干旱胁迫对新疆土桃叶片脯氨酸（PRO）含量的影响

由图4可知，在PEG-6000溶液的干旱胁迫下，各处理的叶片PRO含量整体上呈上升的趋势，不同

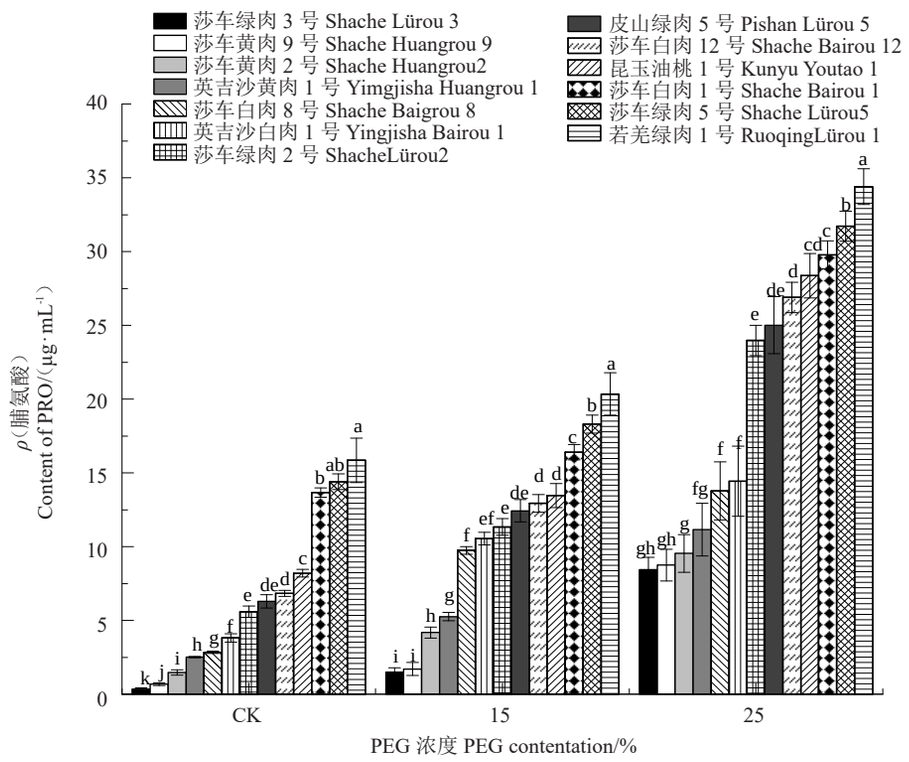


图 4　干旱胁迫对新疆土桃叶片脯氨酸（PRO）含量的影响

Fig. 4　Effects of drought stress on proline (PRO) content in leaves of native peach in Xinjiang

品种和不同梯度下差异显著（$p<0.05$）。当干旱胁迫为15%PEG-6000时，各叶片的PRO含量呈缓慢上升趋势，莎车绿肉3号、莎车黄油桃9号、莎车黄油桃2号和英吉沙黄肉1号叶片PRO的含量显著低于其他品种（$p<0.05$），且与对照组相比增长幅度较慢，各叶片的PRO含量（ρ）分别为1.49 μg·mL^{-1}、1.70 μg·mL^{-1}、4.18 μg·mL^{-1}和5.26 μg·mL^{-1}，比对照组分别增加了77.18%、60.00%、60.48%和52.28%；当干旱胁迫为25%PEG-6000浓度时，叶片PRO含量最高；莎车白油桃1号、莎车绿肉5号和若羌绿肉1号叶片的PRO的含量各处理下增长幅度最大且明显高于其他品种，分别高66.6%、21.9%和105.0%，抗旱性中等品种的PRO的含量增长较慢；结果表明：随着干旱程度的加深，叶片内PRO含量显著增加，以减轻干旱胁迫的影响，抗旱品种PRO含量快速上升，越抗旱的品种PRO含量上升越快。

2.6 干旱胁迫对新疆土桃叶片过氧化物酶（POD）活性的影响

由图5可知，随着干旱胁迫PEG-6000浓度的增加，各处理的叶片POD活性整体上呈先上升后下降的趋势，相同浓度不同品种之间存在显著差异（$p<0.05$），相同品种不同浓度梯度间也存在显著差异（$p<0.05$）。干旱胁迫浓度为15%时，各叶片的POD活性呈快速上升趋势，干旱胁迫浓度为25%时，各叶片的POD活性呈快速下降趋势；莎车绿肉3号各处理时期的POD活性较低，显著低于其他品种（$p<0.05$），CK、15%和25%处理下莎车绿肉3号叶片POD活性分别为139.67 U·g^{-1}、245.00 U·g^{-1}和224.67 U·g^{-1}；若羌绿肉1号3个时期叶片的POD活性最高，显著高于其他品种（$p<0.05$），分别为645.00 U·g^{-1}、816.00 U·g^{-1}和754.00 U·g^{-1}；在CK处理下，莎车黄肉9号和莎车黄肉2号差异不显著，分别为274.00 U·g^{-1}和277.33 U·g^{-1}，莎车白肉8号和英吉沙白肉1号差异不显著，分别为349.67 U·g^{-1}和356.67 U·g^{-1}；在15%处理下，英吉沙白肉1号和莎车绿肉2号差异不显著，分别为447.00 U·g^{-1}和356.33 U·g^{-1}。结果表明：抗氧化能力越强的品种抗旱性也越强。

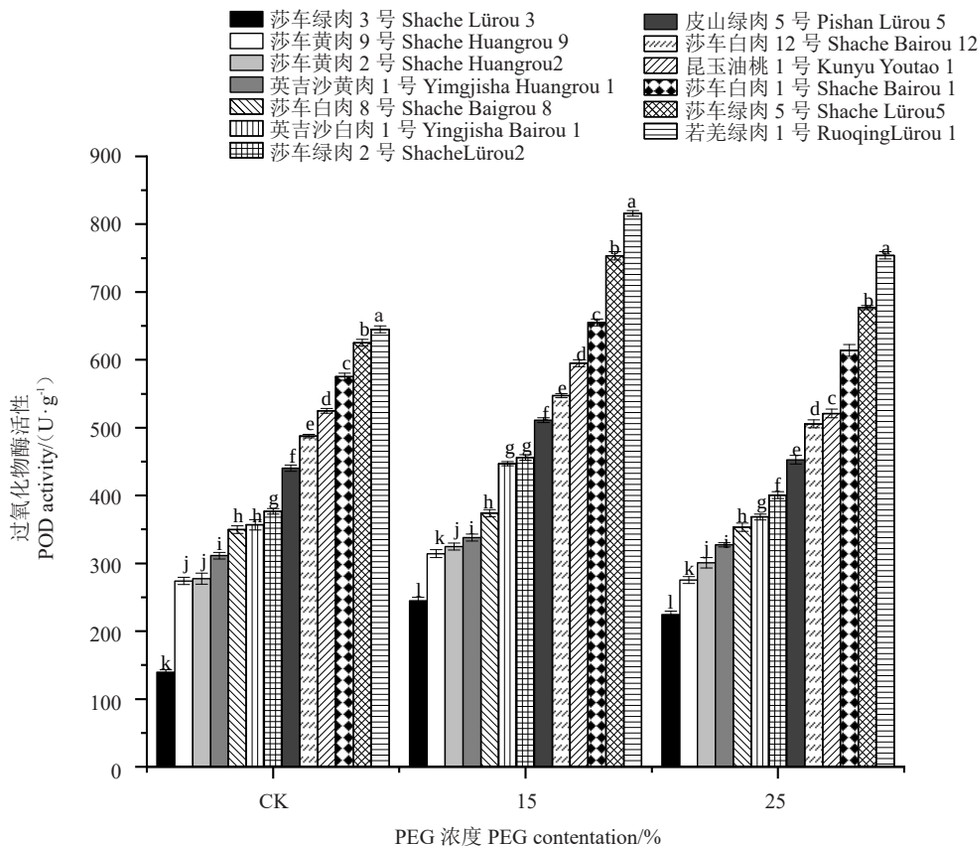


图5 干旱胁迫对新疆土桃叶片POD活性的影响

Fig. 5 Effects of drought stress on peroxidase (POD) activity in leaves of native peach in Xinjiang

3 讨　论

随着气候暖干化趋势的加重，降水量减少，干旱频发，导致作物的生长发育受到限制，从而影响作物产量和品质[17]。萌发期是植物的生长开端，种子萌发期的各项萌发指标严重影响到育苗的各个环节，种子的来源、收集时间和方式也会影响到种子的发芽率和抗旱性，在本研究中，新疆土桃的萌发率较其他内地品种较高，说明其种子饱满程度更高，是更优质的育种材料。

新疆土桃抵御干旱的机制是复杂多样的，抗旱方式也是不同的，因此单纯地依靠一种或少数几个生理生化指标作为抗旱性强弱的依据是不太可靠的，同时不同的指标在反映植物的抗旱性时有所不同，因此需要将各个指标进行综合评定才能做出正确客观的评价。将新疆土桃的抗旱性划分为3类：(1)抗旱性弱：阿图什油桃2号、莎车绿肉3号和莎车黄油桃9号；(2)抗旱性中：莎车黄油桃2号、英吉沙黄肉1号、莎车白肉12号、英吉沙白肉1号、莎车绿肉2号、皮山绿肉5号和莎车白肉12号；(3)抗旱性强的4份种质，分别是昆玉油桃1号、莎车白油桃1号、莎车绿肉5号和若羌绿肉1号。从变异系数来看，新疆桃和普通桃中的个体差异大，挖掘的潜在可能性大，与徐孟琪等[3]的研究结果一致。

MDA含量的高低表明植物受害程度的大小，是细胞膜脂过氧化过程中形成的最终降解产物，是植株抗逆能力的代表性物质，是反映植株在逆境环境下受害程度的重要指标[18]。在干旱胁迫下，细胞脂质过氧化加剧，最终氧化产物是MDA[19]。本研究结果表明，干旱胁迫过程中，新疆土桃叶片的MDA含量整体上呈上升趋势且显著高于对照品种，随着干旱胁迫的加剧，MDA的含量变化幅度快速增大，表明各品种叶片细胞膜在胁迫期间有不同程度的修复，且新疆土桃的抗性更强修复能力也更强，说明新疆土桃具有更好的耐旱性。

渗透调节是植物抵御干旱的一种重要方式，能提高植物对水分的吸收能力，防止细胞脱水，可维持植物在逆境下生长[20]。PRO是植物体内重要的渗透调节物质之一[21]，植物为了抵御干旱，会通过增加PRO含量来减少幼苗与环境的渗透差，以减少干旱胁迫的影响[22]。长时间高浓度的干旱胁迫可导致植物渗透调节能力受限，生理代谢下降，谷氨酸的合成受到影响，进一步影响PRO调节物质的合成。通过代谢活动增加细胞内的溶质浓度，降低细胞质渗透势，从而促使植物从外界吸水，保持膨压，维持植物体正常的代谢活动。本研究结果也证明了这一点，在干旱胁迫浓度为15%时，新疆土桃叶片的PRO含量变化幅度较小，为缓慢上升趋势，但在干旱胁迫浓度为25%时，其含量骤增，表明PRO的大量积累需要一个持续的干旱胁迫信号刺激，瞬时的干旱胁迫不会导致PRO的大量积累[23]，PRO对轻度干旱胁迫反应不敏感，只有在严重的干旱胁迫下才会大量积累，进而表现出其渗透调节的能力。

大量研究表明，POD是植物体内主要的抗氧化酶，能清除对植物有害的活性氧，从而起到保护植物膜系统的作用[24]。在干旱胁迫下，植物会通过提高POD的活性来清除过量的活性氧[25]。说明在PEG-6000低浓度时，POD活性对新疆土桃叶片起到积极作用，有效减少对植物组织的伤害，但随着PEG-6000胁迫浓度的上升及胁迫时间的延长，叶片中的POD保护作用受到限制，细胞受损，酶活性下降，在本研究中，新疆土桃叶片的POD活性呈先上升后下降的趋势，这是由于砧木在低浓度干旱胁迫下启动了酶促活性氧清除系统，胁迫后期PEG浓度25%时，POD活性明显呈下降趋势，表明此时POD结构受到严重破坏，活性受到抑制，植株受到伤害较严重，表现出较弱的抗旱性。

4 结　论

笔者在本研究中通过干旱模拟试验对14份新疆土桃和7份特殊种质对照品种的萌发指标、抗旱表型、生理特性进行综合评价，得出以下结论：1.新疆土桃的种子发芽率高，生长势强。2.新疆土桃抗旱性个体差异大，挖掘抗旱砧木潜能更大；土桃抗旱性总体表现为新疆桃强于普通桃。抗旱能力划分为3个等级，(1)抗旱性弱：阿图什油桃2号、莎车绿肉3号和莎车黄油桃9号；(2)抗旱性中等：莎车黄油桃2号、英吉沙黄肉1号、莎车白肉12号、英吉沙白肉1号、莎车绿肉2号、皮山绿肉5号和莎车白肉12号；(3)抗旱性强：昆玉油桃1号、莎车白油桃1号、莎车绿肉5号和若羌绿肉1号。3.新疆土桃生理特性具体表现为：PEG-6000低浓度处理时，MDA和PRO的含量变化为缓慢上升趋势，PRO的活性为快速上升趋势；PEG-6000高浓度处理时，MDA和PRO的含量

变化为快速上升趋势，PRO的活性为快速下降趋势。本研究结果在一定程度上明确了新疆土桃的抗旱机制和生理特性，为后续进一步挖掘新疆土桃抗旱基因及抗旱品种的选育提供了理论基础。

参考文献 References：

[1] 张钊 . 新疆桃树种质资源[J]. 作物品种资源，1990(4)：5-6.
ZHANG Zhao. Germplasm resources of peach trees in Xinjiang[J]. China Seed Industry，1990(4)：5-6.

[2] 徐庆岫 . 形形色色的新疆桃[J]. 新疆农业科学，1990，27(1)：35.
XU Qingxiu. Various kinds of Xinjiang peach[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，1990，27(1)：35.

[3] 徐孟琪，卢彩红，朱更瑞，邵亚杰，李勇，吴金龙，谢景梅，王新卫，王力荣 . 南疆 133 份土桃种质表型多样性分析[J]. 果树学报，2024，41(12)：2369-2376.
XU Mengqi，LU Caihong，ZHU Gengrui，SHAO Yajie，LI Yong，WU Jinlong，XIE Jingmei，WANG Xinwei，WANG Lirong. Phenotypic diversity analysis of 133 accession local peach germplasm in Southern Xinjiang[J]. Journal of Fruit Science，2024，41(12)：2369-2376.

[4] 李文清 . 河西走廊及塔里木盆地桃遗传多样性分析[D]. 北京：中国农业科学院，2022.
LI Wenqing. Genetic diversity analysis of peach in Hexi Corridor and Tarim Basin[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2022.

[5] 徐孟琪，李勇，王力荣 . 基于 SSR 荧光标记法的桃同名异物品种鉴定技术与应用[J]. 果农之友，2024(11)：1-6.
XU Mengqi，LI Yong，WANG Lirong. Identification technology and application of peach homonymous foreign body varieties based on SSR fluorescent labeling[J]. Fruit Growers' Friend，2024(11)：1-6.

[6] 耿志卓，丁立人，逯亚玲，李志华，琳琳珊，周霞，唐礼 . 外源水杨酸对不同水分胁迫下分枝期紫花苜蓿生长和生理特性的影响[J]. 草地学报，2016，24(2)：369-376.
GENG Zhizhuo，DING Liren，LU Yaling，LI Zhihua，LIN Linshan，ZHOU Xia，TANG Li. Effects of salicylic acid on growth and physiological properties of *Medicago sativa* in branching stage under different water stress[J]. Acta Agrestia Sinica，2016，24(2)：369-376.

[7] WANG Z Y，YANG Y C，YADAV V，ZHAO W，HE Y P，ZHANG X，WEI C H. Drought-induced proline is mainly synthesized in leaves and transported to roots in watermelon under water deficit[J]. Horticultural Plant Journal，2022，8(5)：615-626.

[8] 孔令芳，杨晓燕 . 云南省干旱成因及对策分析[J]. 大理学院学报，2014(12)：52-55.
KONG Lingfang，YANG Xiaoyan. Analysis of drought in Yunnan：Causes and countermeasures[J]. Journal of Dali University，2014(12)：52-55.

[9] 孙亚瑞，张峰程，许彬，何俊，孟静 . PEG-6000 模拟干旱胁迫对弥勒苣苔生长的影响[J]. 西部林业科学，2022，51(1)：89-94.
SUN Yarui，ZHANG Fengcheng，XU Bin，HE Jun，MENG Jing. Effect of PEG-6000 simulation drought stress on growth of *Oreocharis mileensis*[J]. Journal of West China Forestry Science，2022，51(1)：89-94.

[10] 刘艳，卓维，黄红燕，任风鸣 . 牛至种子萌发特性研究[J]. 中国野生植物资源，2022，41(10)：30-35.
LIU Yan，ZHUO Wei，HUANG Hongyan，REN Fengming. Study on the seed germination characteristics of *Origanum vulgare* L. ssp. *vulgare* L.[J]. Chinese Wild Plant Resources，2022，41(10)：30-35.

[11] 屈璐璐，山丹，李晓杰，马一鸣，张晓明，王俊杰 . PEG 模拟干旱胁迫对 5 份三叶草材料种子萌发的影响[J]. 种子，2019，38(12)：109-112.
QU Lulu，SHAN Dan，LI Xiaojie，MA Yiming，ZHANG Xiaoming，WANG Junjie. Effects of PEG-simulated drought stress on seed germination of five kinds of clover plants[J]. Seed，2019，38(12)：109-112.

[12] 曲艳华，李冬梅，赵丽君，阿布都外力·木米尼，朱立新，贾克功 . 野生新疆桃抗酸碱盐性评价[J]. 中国农业大学学报，2014，19(3)：115-120.
QU Yanhua，LI Dongmei，ZHAO Lijun，Abuduwaili · Mumini，ZHU Lixin，JIA Kegong. Evaluation on the resistance of wild *Prunus ferganensis* to acidity，alkalinity and salinity[J]. Journal of China Agricultural University，2014，19(3)：115-120.

[13] 张治安，陈展宇 . 植物生理学实验技术[M]. 长春：吉林大学出版社，2008.
ZHANG Zhian，CHEN Zhanyu. Experimental techniques in plant physiology[M]. Changchun：Jilin University Press，2008.

[14] 叶尚红 . 植物生理生化实验教程[M]. 昆明：云南科技出版社，2004.
YE Shanghong. Plant physiological and biochemical test course[M]. Kunming：Yunnan Science and Technology Press，2004.

[15] 柳政戎，马明呈，吕才忠，李刚，鲍玉英，张建荣 . PEG-6000 模拟干旱胁迫对陕甘花楸耐旱性生理指标的影响[J]. 天津农林科技，2024(1)：22-26.
LIU Zhengrong，MA Mingcheng，LÜ Caizhong，LI Gang，BAO Yuying，ZHANG Jianrong. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on physiological indexes of drought tolerance of *Sorbus koehneana* Schneid[J]. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry，2024(1)：22-26.

[16] 李亚娇，马培杰，罗文举，舒健虹，陈莹，龙忠富，王小利 . 干旱胁迫对百脉根形态和生理指标的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医，2023(24)：85-93.
LI Yajiao，MA Peijie，LUO Wenju，SHU Jianhong，CHEN Ying，LONG Zhongfu，WANG Xiaoli. Effects of drought stress on morphological and physiological indexes of *Lotus japonicus*[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine，2023(24)：85-93.

[17] 赵海燕，侯美亭，刘文平，马雅丽 . 干旱指数在山西逐日监测中的适用性研究[J]. 干旱气象，2014，32(4)：505-515.

ZHAO Haiyan，HOU Meiting，LIU Wenping，MA Yali. Application of drought index in daily monitoring in Shanxi[J]. Journal of Arid Meteorology，2014，32(4)：505-515.

[18] 李志刚，刘威，林彰文，顾继光．芦笋在 PEG 模拟干旱条件下的生理生化变化[J]. 生态科学，2006，25(1)：21-24.
LI Zhigang，LIU Wei，LIN Zhangwen，GU Jiguang. Study on biophysical-chemical change of *Asparagus* under PEG stress[J]. Ecologic Science，2006，25(1)：21-24.

[19] 张清航，张永涛．植物体内丙二醛（MDA）含量对干旱的响应[J]. 林业勘查设计，2019，48(1)：110-112.
ZHANG Qinghang，ZHANG Yongtao. Study on response to drought stress of MDA content in plants[J]. Forest Investigation Design，2019，48(1)：110-112.

[20] 王建军，林文华，赵玉婷．羊茅幼苗对温度和土壤水分胁迫的生理生化响应[J]. 植物功能生物学，2017，44(10)：1007-1015.
WANG Jianjun，LIN Wenhua，ZHAO Yuting. Physiological and biochemical responses of fescue seedlings to temperature and soil water stress[J]. Plant Functional Biology，2017，44(10)：1007-1015.

[21] 胡筱璇．3 种蚊母树的扦插繁殖及对水分胁迫的生理响应[D]. 长沙：中南林业科技大学，2022.
HU Xiaoxuan. The study on cutting propagation techniques of 3 *Distylium* species and physiological response to water stress[D]. Changsha：Central South University of Forestry & Technology，2022.

[22] 肖小辉，李天成，周湘林，陈伟，张剑梅．干旱胁迫对闽楠幼苗的生长及生理特性的影响[J]. 中国农业文摘-农业工程，2023，35(3)：17-21.
XIAO Xiaohui，LI Tiancheng，ZHOU Xianglin，CHEN Wei，ZHANG Jianmei. Effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of Minnan seedlings[J]. Agricultural Science and Engineering in China，2023，35(3)：17-21.

[23] 李予霞，崔百明，董新平，郁松林．PEG 处理下葡萄试管苗脯氨酸及内源 ABA 含量变化的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版)，2004，22(1)：43-45.
LI Yuxia，CUI Baiming，DONG Xinping，YU Songlin. A study on proline and ABA content changs under water stress induced by PEG[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science)，2004，22(1)：43-45.

[24] 吕庆，郑荣梁．干旱及活性氧引起小麦膜脂过氧化与脱酯化[J]. 中国科学 C 辑：生命科学，1996，26(1)：26-30.
LÜ Qing，ZHENG Rongliang. Drought and reactive oxygen species induced membrane lipid peroxidation and deesterification of wheat[J]. Science in China，Ser. C，1996，26(1)：26-30.

[25] 杨舒贻，陈晓阳，惠文凯，任颖，马玲．逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2016，45(5)：481-489.
YANG Shuyi，CHEN Xiaoyang，HUI Wenkai，REN Ying，MA Ling. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)，2016，45(5)：481-489.