

分类号：
学号：20212112079

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



‘突尼斯软籽’石榴对低温的响应及越冬防寒措施研究

学位申请人

黄梦真

指导教师

刁明 教授

杨磊 副研究员

申请学位类别

专业学位

专业名称

农业

研究领域

农业工程与信息技术

所在学院

农学院

中国·新疆·石河子

2023 年 11 月

**Study on the Response of 'Tunisia Soft-seed' Pomegranate to Low
Temperatures and Measures for Overwintering and Cold Protection**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Huang meng-zhen

(Agricultural Engineering and Information Technology)

Dissertation Supervisor: Prof. Diao Ming

AR. Yang Lei

November, 2023

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：黄梦真

时间：2023年11月8日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：黄梦真

时间：2023年11月8日

导师签名：刁明

时间：2023年11月8日

摘要

【目的】‘突尼斯软籽’石榴具有高产、果实品质优良、软籽宜食等特点而成为近年来新疆石榴主栽区重要引种栽培品种之一。但因其喜温畏寒，低温冻害是制约‘突尼斯软籽’石榴在新疆引种栽培成功和产量形成的重要因素。因此，本试验一方面研究‘突尼斯软籽’石榴幼树枝条对不同低温处理的生理响应，揭示其抗寒特性，以期为在新疆地区引种栽培及推广应用提供借鉴和依据。另一方面，通过调查分析大田及塑料大棚‘突尼斯软籽’石榴冬季不同防寒越冬措施的防护效果，以期筛选出适宜的防寒越冬措施，旨在为‘突尼斯软籽’石榴的安全过冬提供理论依据与技术支持。

【方法】以新疆主栽区的‘叶城酸石榴’（耐寒性强）和引种的‘突尼斯软籽’石榴一年生枝条为试验材料，研究不同低温胁迫处理下，两个品种石榴枝条的生理指标的动态响应差异，旨在揭示‘突尼斯软籽’石榴的抗寒特性；以1年生‘突尼斯软籽’石榴为试材，设置露地3种覆土厚度下的7种物理保护措施共21个处理，测定不同物理防寒措施下，石榴树体周围的温湿度变化情况，并调查分析翌年春季‘突尼斯软籽’石榴的冻害情况；以3年生‘突尼斯软籽’石榴为试材，在20连塑料大棚设置5种和19连设置2种防寒保护措施，调查分析翌年春季石榴的冻害情况，以筛选适宜的冬季防寒越冬措施。

【结果和结论】

1、‘突尼斯软籽’石榴对低温的生理生化响应：

(1) 随着胁迫温度的下降，‘突尼斯软籽’石榴和‘叶城酸石榴’1年生枝条的相对电导率、超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase, SOD）活性、过氧化氢酶（Catalase, CAT）活性、过氧化物酶（Peroxidase, POD）活性、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量均呈上升趋势。同一低温下SOD活性、CAT活性、POD活性、可溶性蛋白含量随着低温持续时间延长呈现先升高后下降趋势，相对电导率和可溶性糖含量均呈上升趋势。

(2) 随着胁迫温度的降低，‘突尼斯软籽’石榴和‘叶城酸石榴’对低温的忍耐时间缩短。‘突尼斯软籽’石榴幼苗在-4℃下能忍受48 h以上的低温胁迫，-6℃下能忍受36 h，-8℃下能忍受30 h，-10℃下能忍受18 h，-12℃下能忍受12 h。而‘叶城酸石榴’幼苗在-4℃和-6℃下能忍受48 h以上的低温胁迫，-8℃下能忍受42 h的低温胁迫，-10℃下忍受36 h，-12℃下忍受30 h。‘叶城酸石榴’的抗寒性强于‘突尼斯软籽’石榴。

2、‘突尼斯软籽’石榴防寒措施研究：

新疆冬季气候寒冷，在传统埋土防寒措施下，‘突尼斯软籽’石榴仍发生严重冻害，需采取其他物理保护措施与覆土相结合的方式，才能较好地避免‘突尼斯软籽’石榴遭受冻害。研究得出草帘+钢筋+覆土以及草帘+塑料膜+覆土的防寒措施对软籽石榴安全越冬效果较好，均可有效提高石榴树体微环境的湿度、日平均温度及日最低温度，且草帘+塑料膜+覆土15cm防寒措施下覆盖的

‘突尼斯软籽’石榴整体冻害最轻（冻害指数 8.3%）可以推广应用。单纯的塑料大棚设施栽培并不能对‘突尼斯软籽’石榴起到良好的防冻抗旱效果，在塑料大棚内搭建小拱棚并在其上覆盖草帘能够保证软籽石榴安全越冬。

关键词：石榴；抗寒性；低温胁迫；抗氧化酶；防寒措施

Abstract

【Object】 'Tunisia Soft-seed' pomegranate with high yield, excellent fruit quality, soft seed edible and other characteristics and in recent years, Xinjiang pomegranate has become one of the important introduction of cultivars in the main planting area. However, because of its warmth and fear of cold, low-temperature frost damage is an important factor that restricts the success of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate cultivation and yield formation in Xinjiang. Therefore, in this study, on one hand, we investigated the physiological responses of young 'Tunisia Soft-seed' pomegranate branches to different low-temperature treatments, and revealed its cold-resistant characteristics, with a view to providing reference and basis for the introduction of cultivation and popularization of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate in Xinjiang. On the other hand, we investigated and analyzed the protective effects of different wintering measures of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate in the field and cold greenhouse, and screened out the suitable wintering measures, aiming to provide a reliable theoretical basis and technical support for 'Tunisia Soft-seed' pomegranate's safe wintering.

【Methods】 Using the cold-tolerant 'Yecheng sour pomegranate' from the main cultivation area of Xinjiang and the introduced 'Tunisia Soft-seed' pomegranate annual branches as test materials, we studied the differences in the dynamic response of physiological indexes of the pomegranate branches of the two varieties under different low-temperature stress treatments with the aim of revealing the cold-resistant characteristics of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate were investigated. Using one-year-old 'Tunisia Soft-seed' pomegranate as test material, a total of 21 treatments were set up with seven physical protection measures under three soil cover thicknesses in the open ground to determine the temperature and humidity changes around the pomegranate trees were measured, and the frost damage of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate in the following spring was investigated and analyzed. 3-year-old 'Tunisia Soft-seed' pomegranate was used as the test material, and five kinds of cold protection measures were set up in 20 companies and two kinds of cold protection measures were set up in 19 companies, and the cold protection measures were investigated and analyzed. Investigate and analyze the frost damage of pomegranate in the following spring in order to screen suitable winter protection measures against cold overwintering.

【Results】

1 Physiological and biochemical response of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate to low temperature:

(1) As the stress temperature decreased, the relative electrical conductivity, Superoxide dismutase (SOD) activity, Catalase (CAT) activity, Peroxidase (POD) activity, soluble protein content, soluble sugar content, and soluble protein content of the annual branches of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate and 'Yecheng acid pomegranate' were found to be higher than those of 'Tunisia Soft-seed' and 'Yecheng acid pomegranate'. (Catalase (CAT) activity, Peroxidase (POD) activity, soluble protein content and soluble sugar content all showed an increasing trend. At the same low temperature, SOD activity, CAT activity, POD

activity and soluble protein content showed a trend of increasing and then decreasing with the prolongation of low temperature, while the relative conductivity and soluble sugar content showed an increasing trend, and the activities of SOD, POD and CAT were positively correlated with the cold resistance of pomegranate.

(2) With the decrease of stress temperature, the tolerance time of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate and 'Yecheng sour pomegranate' to low temperature was shortened. 'Tunisia Soft-seed' pomegranate seedlings could tolerate low-temperature stress for more than 48 h at -4°C, 36 h at -6°C, 30 h at -8°C, 18 h at -10°C, and 12 h at -12°C. Whereas 'Yecheng sour pomegranate' seedlings could tolerate low-temperature stress for more than 48 h at -4°C and -6°C, 42 h at -8°C, 36 h at -10°C, and 30 h at -12°C. 'Yecheng sour pomegranate' was more cold-resistant than 'Tunisia Soft-seed' pomegranate. The cold resistance of 'Yecheng sour pomegranate' is stronger than that of 'Tunisia Soft-seed' pomegranate.

2, Studies on cold protection measures for 'Tunisia Soft-seed' pomegranate:

Xinjiang winter climate is cold, in the traditional buried soil cold protection measures, 'Tunisia Soft-seed' pomegranate still occurred serious frost damage, need to take other physical protection measures and mulching combined way, in order to better avoid 'Tunisia Soft-seed' pomegranate suffered frost damage. The results showed that the cold-proof measures of straw curtain + steel bar + soil covering and straw curtain + plastic film + soil covering had a good effect on the safe wintering of soft-seeded pomegranates, which could effectively improve the humidity, daily average temperature and daily minimum temperature of the pomegranate tree microenvironment, and the overall frost damage of 'Tunisian Soft-seed' pomegranates covered by straw curtain + plastic film + soil covering 15cm cold-proof measures was the lightest (frost damage index 8.3%), which could be popularized and applied. Cultivation of plastic greenhouses facilities alone does not provide good frost and drought protection for 'Tunisia Soft-seed' pomegranates, and the construction of small arches in cold greenhouses and the covering of grass curtains on them can ensure the safe overwintering of soft-seeded pomegranates.

Key words: Pomegranate ; Cold resistance; Low temperature stress; Antioxidant enzymes; Cold protection treatments

目录

第 1 章 文献综述	1
1.1 引言	1
1.2 植物抗寒性研究进展	2
1.2.1 植物抗寒性	2
1.2.2 细胞膜系统和植物抗寒性的关系	2
1.2.3 渗透调节物质和植物抗寒性的关系	4
1.3 石榴防寒措施研究进展	6
1.4 石榴抗寒性研究进展	7
1.5 研究目的与意义	7
1.6 试验研究内容及技术路线	8
1.6.1 研究内容	8
1.6.2 本研究技术路线	8
第 2 章 ‘突尼斯软籽’ 石榴对低温的生理生化响应	9
2.1 材料与方法	9
2.1.1 试验材料	9
2.1.2 试验设计	9
2.1.3 相关生理指标的测定方法	9
2.1.4 数据处理与分析	11
2.2 结果与分析	12
2.2.1 不同低温处理对石榴一年生枝条相对电导率的影响	12
2.2.2 不同低温处理对石榴一年生枝条 SOD 活性变化的影响	14
2.2.3 不同低温处理对石榴一年生枝条 POD 活性变化的影响	15
2.2.4 不同低温处理对石榴一年生枝条 CAT 活性变化的影响	17
2.2.5 不同低温处理对石榴一年生枝条可溶性蛋白含量变化的影响	18
2.2.6 不同低温处理对石榴一年生枝条可溶性糖含量变化的影响	19
2.3 讨论	21
2.3.1 相对电导率与抗寒性	21
2.3.2 保护酶与抗寒性	21
2.3.3 渗透调节物质与抗寒性	22

2.4 小结	22
第3章 ‘突尼斯软籽’ 石榴防寒越冬措施的防护效果研究	24
3.1 材料与方法	24
3.1.1 石榴种植区概况	24
3.1.2 大田不同防寒措施下 ‘突尼斯软籽’ 石榴防寒越冬效果研究	24
3.1.3 塑料大棚不同防寒措施下 ‘突尼斯软籽’ 石榴防寒越冬效果研究	26
3.2 结果与分析	28
3.2.1 石榴越冬期气象数据统计	28
3.2.2 大田不同防寒措施对 ‘突尼斯软籽’ 石榴防寒效果的影响	29
3.2.3 塑料大棚不同防寒措施下 ‘突尼斯软籽’ 石榴冻旱情况调查	36
3.3 讨论	40
3.3.1 ‘突尼斯软籽’ 石榴冻害与低温程度的关系	40
3.3.2 不同物理防寒措施对石榴树体微环境的影响	41
3.3.3 不同物理防寒措施对 ‘突尼斯软籽’ 石榴冻旱的影响	42
3.4 小结	43
第4章 结论与展望	44
4.1 结论	44
4.1.1 ‘突尼斯软籽’ 石榴对低温的生理生化响应	44
4.1.2 ‘突尼斯软籽’ 石榴防寒措施研究	44
4.2 展望	44

第1章 文献综述

1.1 引言

石榴 (*Punica granatum* L.) 为属石榴科 (*Punicaceae*)、石榴属 (*Punica* L.)，属亚热带植物，喜温畏寒，耐贫瘠，适宜在温暖气候条件下生长。石榴在冬季休眠期可承受-16℃及以上温度，-17℃受冻害，-20℃多数被冻死^[1-4]。近几年，中国北方石榴主产区在冬季出现异常低温的情况时有发生，导致石榴种植业损失惨重，中国石榴生产与发展的制约因素之一在于其耐寒性，因此如何采取切实有效的措施以降低冻害损失，已成为石榴生产亟需解决的难题。

‘突尼斯软籽’石榴是国家林业考察团于1986年由突尼斯引种，经栽培选育而成，2002年被命名为‘突尼斯软籽’石榴^[4]，通过几十年的栽培试验与观察，在各项性状上表现突出，尤其是早熟（8月上旬~9月上旬成熟）、籽粒大、色泽鲜艳、果仁特别柔软的特性比较突出，受到消费者欢迎，为我国石榴主要栽培品种，经济效益十分可观^[5]。‘突尼斯软籽’石榴耐旱，抗病性强，适应性广，对土壤的选择并不严格，不管是平原，丘陵还是浅山坡地只要有深厚的土层，都能很好地生长，但是‘突尼斯软籽’石榴源产自非洲突尼斯共和国，该地区气候温暖，8月份为最热季节，日平均气温21~33℃；1月份是最冷的月份，日平均气温在6~14℃之间，推广中发现‘突尼斯软籽’石榴1年生幼苗，在气温-10℃以下易受冻，2年生以上抗寒性提高^[6]。

石榴是新疆的传统特色果树，近年来随着新疆农业结构的调整，石榴产业发展较快，目前，石榴栽培面积达到30余万亩，其中南疆为新疆石榴品种最适栽培区^[7]。新疆石榴栽培区属于温带干旱气候区，夏季该区气候条件能满足石榴的正常生长和发育，而冬季绝对最低气温在-29.9-27.5℃之间，极易出现-17℃以下^[8]，而在南疆地区气候极端干旱的情况下，气温低于-14℃即出现冻害抽条现象，而这种低温(-14℃)在南疆冬季较为常见^[9]。因冬季严寒，绝对低温低，持续时间长等特点，在新疆地区，石榴的种植通常采用匍匐栽培的方式，向南倾斜种植为新疆石榴常用的定植模式，向南倾斜避免了正午太阳对石榴苗主枝基部的直接照射，防止主枝基部被日灼烧伤从而诱发病害，倾斜角度为60°左右，以便于冬季下压埋土^[10]。目前新疆石榴最安全的越冬方式是埋土^[11]，一般在十月底至十一月中旬人工埋土越冬。随着冬季的到来，大量石榴苗遭受冻害甚至死亡，严重制约了石榴产业的健康发展。

1.2 植物抗寒性研究进展

1.2.1 植物抗寒性

温度是影响植物生长发育的重要环境因子，温度过高或过低均会影响植物的生长发育。根据气温高低和植物受损情况将其划分为冷害冻害两种类型^[12]。在零度以上的低温下，虽然不会结冰，但却会引起喜温植物的生理障碍，导致植株受伤甚至死亡，这就是冷害。植物适应零度以上低温能力被称为抗冷性^[13]。在温度低于 0℃的情况下，植株会发生冻伤，甚至是致死，这就是冻害，植物对零度之下的温度的适应能力，被称作抗冻性^[14]。

1.2.2 细胞膜系统和植物抗寒性的关系

植物细胞与细胞器之间的交界面所构成的结构，即细胞膜，具有重要的生物学意义^[15]。自 Singer 和 Nicobgon 于 1972 年提出流动相嵌模型^[16]以来，对于膜系统结构与功能在生物生命活动中的地位与作用，已经得到了充分的认可^[17]。细胞被膜是构成细胞骨架的关键组分，它的稳定性和流动性对于维持细胞正常的生理功能非常重要^[18]。而各种逆境对细胞的影响则主要发生在细胞膜上，低温损伤亦然^[19]。

1.2.2.1 相对电导率和植物抗寒性的关系

低温对植株的伤害很大程度上取决于其细胞膜的渗透性。通常，植物的质膜是选择性半透膜，而在逆境条件下，类囊体结构发生分解，从而降低质膜的选择性，导致胞内液的外流^[20]。Lyons^[21]认为，在低温胁迫下，植株的细胞膜透性会出现不同程度的改变，胞间物质浓度提高，导致相对电导率升高，而抗寒能力较强的品种则不会受到太大的伤害，膜透性的上升幅度也很小，很容易回复到正常状态。抗寒能力差的品种，其细胞膜透性增大，细胞受损，不能完全恢复^[22]。判断植物抗寒能力的首要依据是膜脂损伤导致细胞内的某些物质向外渗透，造成细胞电导率的改变^[23]。前期研究采用电导率法测定植物的电解质渗透性，并通过 Logistic 方程得到植物的半致死温度（LT₅₀），可反映植物抗寒能力^[24]。王红平^[25]等通过测定 5 种苹果砧木的深度休眠枝条相对电导率，利用 Logistic 方程测定 LT₅₀ 值，用目测法计算出相应胁迫温度下冻害指数。试验结果表明，在低温胁迫条件下，在 5 种苹果砧木的枝条的相对电导率值均呈现“S”型曲线的变化趋势，并且相对电导率值与胁迫温度之间呈现出极为显著的负相关关系，为了测定各品种苹果砧木的半致死温度，用相对电导率拟合 Logistic 方程，计算出冻害指数随胁迫温度下降而不等量增加，在某一低温区出现突然越级现象，然后按冻害指数进行计算，推断了 5 种苹果砧木枝条品种抗寒性的强弱次序。曲跃军等

[26]通过对4个果桑品种进行低温处理,并测定其枝条的相对电导率,采用 Logistic 方程构建果桑抗寒性预测模型,结果表明4种果桑枝条的相对电导率值均呈现随温度下降而增大,但非线性增加,而是呈现“S”形曲线上升,且经过5年寒地低温驯化,4个果桑品种 LT_{50} 值的降低幅度均为 5°C 左右。由此可见,不同植物、同一植物不同品种之间的相对电导率,能体现植物耐寒能力,用电导法测试果树耐寒能力,可做为植株抗寒性评价的重要生理指标。

1.2.2.2 丙二醛 (MDA) 和植物抗寒性的关系

丙二醛 (MDA) 含量是反应低温胁迫后质膜稳定性的又一重要指标。低温环境中,细胞中产生超氧自由基导致不饱和脂肪酸脂氢过氧化反应生成 MDA 等细胞毒性物质,会损伤细胞膜系统。常温下植物中 MDA 含量极少,但当植物遭受逆境伤害时,细胞膜系统遭受严重损伤,MDA 含量升高,因此 MDA 含量是能够反映植物所受伤害程度的一项至关重要的指标^[27]。研究表明植株抗寒性与 MDA 含量之间存在显著的负相关关系,即若一个品种 MDA 含量受低温影响而剧增,则其抗寒性较差,否则抗寒性较强。刘益勇^[28]等利用耐寒性强的野生番茄‘喀西茄’为砧木,栽培种‘荷包番茄’为接穗,发现嫁接‘喀西茄’的砧木后,荷包茄叶片 MDA 含量显著降低,说明嫁接‘喀西茄’提高了‘荷包茄’的耐冷性。仙米西努尔·克里木等^[29]测定了4个不同核桃品种在经历不同低温处理时生理指标的变化情况,结果发现 MDA 含量随处理温度降低先升高后降低,并与核桃抗寒性成负相关。郭扬^[30]利用敏感型玉米品种与耐冷型玉米品种2个玉米品种在低温条件下生长4周,并对生理指标进行测定,试验发现随着低温胁迫处理持续时间增加,2个品系均受到一定生理损害,MDA 含量显著升高,但是抗性品系玉米 MDA 含量升高幅度明显低于敏感品系。这表明 MDA 已被广泛用于植物膜脂过氧化程度和低温反应强度的检测。

1.2.2.3 保护酶和植物抗寒性的关系

一般来说,植物本身就有完整的抗氧化防御系统,由酶促和非酶促组成,超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 以及过氧化氢酶 (CAT) 为酶促防御系统中的三种保护性酶,它们具有一定清除活性氧的功能,以此保护光合器官、膜及生物功能分子等,所以植物在正常生命活动中所产生的活性氧及自由基,对植物本身没有威胁^[31]。而当植物遭受低温胁迫后,由于细胞中活性氧的生成与代谢的失衡,导致膜系统的稳定遭到破坏,活性氧累积引起膜脂过度氧化和脱脂,进而导致膜结构崩溃,SOD 酶具有清除细胞中超氧自由基 O_2^- 的功能,进而维护膜系统的稳定,但同时产生歧化性产物 H_2O_2 , H_2O_2 是一种毒性气体,能够与铜、铁等金属离子发生化学反应,从而生成其它毒性化合物,损害细胞中的大分子并使其氧化。但 H_2O_2 积累对 SOD 酶活力

有抑制作用,使 SOD 酶活力下降。POD 酶和 CAT 酶均能有效地去除 H_2O_2 生成的水,3 种酶的协同作用将自由基含量控制在较低水平,减少对植株毒性 [32]。

杨豫等^[33]鉴定了 4 个酿酒葡萄品种枝条的抗寒性,发现 CAT 活性和抗寒性之间存在负相关关系,SOD 活性、POD 活性与抗寒性呈正相关关系。杨复康等^[34]以 4 种杏 1 年生休眠枝条及带花枝条作为试验材料,进行了不同低温处理,结果表明随温度下降,枝条和花朵中 SOD 活性先增加后减小,受低温影响,细胞内 SOD 活性升高以保护植物抵御寒冷。赵悦等^[35]研究了夜间低温胁迫对番茄不同品种抗氧化酶活性的影响,表明低温处理番茄叶片后其 SOD 和 CAT 活性先升高后降低。经过一段时间的低温处理,抗氧化酶活性增强并达到一定的峰值,表明植株增强了其对低温环境的适应性,有利于番茄幼苗抵抗低温氧自由基的伤害,但峰值过后开始下降,可能到了低温胁迫时间的临界值,植物对活性氧和自由基的清除功能就会下降乃至消失。抗寒性较弱的番茄品种较抗寒性较强的品种下降幅度大,说明抗寒性较弱的品种保护酶活性随着胁迫的进行而提前受到损害,而抗寒性较好的品种酶活性较高则表明抗寒性较弱品种对于低温胁迫具有较强的抗逆性,但这种防御能力会随着低温胁迫时间的延长而削弱甚至消失,因而有衰退的趋势。CAT 能清除体内 SOD 经低温处理生成的 H_2O_2 ,因此其 SOD 活性峰值的出现时间比 CAT 晚;CAT 在维持植物细胞的稳定性方面扮演着至关重要的角色,它是构成生物防御体系的主要酶之一^[36]。随着低温胁迫时间的延长,POD 活性呈现出稳定上升的趋势,而植物在受到冷刺激时则表现出酶活性的提高,从而增强了其对低温胁迫的适应能力。段景秀等^[37]通过对 5 个马铃薯抗寒野生种和 1 个不抗寒栽培种进行抗寒性的表型鉴定及相关生理指标测定,结果表明 5 个抗寒野生种在低温胁迫下,SOD 活性先下降后上升再下降,而非抗寒品种 SOD 活性总体比其它品种低,低温驯化后也没有提高,说明 SOD 活性较高可能是耐寒性增强的一个重要原因。由此可见,植物抗寒能力与其保护酶活性关系密切。

1.2.3 渗透调节物质和植物抗寒性的关系

1.2.3.1 可溶性蛋白和植物抗寒性的关系

可溶性蛋白是一种渗透调节物,它作为亲水胶体具有很强的吸水能力,可增加胞内结合水、降低凝固点和原生质体被冻伤的几率^[27]。可溶性蛋白含量与抗寒性关系密切,经过一定低温锻炼后可溶性蛋白含量增加,保水能力提高,温度过低则失去保水能力,可溶性蛋白含量也随之降低。在小麦研究中,Sarhan^[38]发现小麦在低温驯化过程中蛋白质含量增加。李春生^[39]等研究发现,在同一低温处理条件下,草莓叶片可溶性蛋白含量随着时间呈先增加后减少趋势,而在同一时间进行不同温度的处理后,常温下生长的草莓叶片,即未受到低温胁迫的对照组可溶性蛋白含量最少。李清亚等^[40]

在对豆梨抗寒性的研究中,发现抗寒性强的豆梨品种‘克利夫兰’能够在低温下大量累积可溶性蛋白。但杨向娜^[41]的研究显示,可溶性蛋白与植株的抗冷性没有显著相关性,不能单独作为抗寒指标来使用。究其原因,是因为不能通过单一的指标来准确反映植物的抗寒能力,而是受到时间、树龄、温度、取样时间等多种因素的综合影响,很明显,植物的抗寒性与可溶性蛋白之间存在着错综复杂的关系。

1.2.3.2 可溶性糖和植物抗寒性的关系

可溶性糖是植物光合产物和碳水化合物储存和代谢的主要方式,可溶性糖能够提高植物的抗寒能力,其作用机制为植物提供底物、碳源及促进其它与抗寒有关的代谢过程;使细胞结冰温度下降,提高细胞液浓度及渗透势,在低温时充当保护剂,增强原生质的保护能力使蛋白质胶体不遇冷变性固化^[42]。王小乐等^[43]研究发现,在低温条件下蔗糖能提高不同菊花品种的幼苗存活率、保护组织结构、增加绿叶数、促进恢复生长、提高遗传稳定性,这说明蔗糖可以有效地增强植株抗寒性。大量的研究证实可溶性糖含量与植物抗寒性成正相关关系,葡萄^[44]、梨树^[45]、大叶女贞^[46]、平欧榛^[47]等植物在低温条件下可溶性糖含量较高。杨秀娟^[48]对苜蓿的抗寒能力进行了研究,结果表明不同的抗寒性品种,在苜蓿的冷适应阶段,体内的糖分积累并无显著差异。简令成等^[49]通过对小麦的研究发现,在抗寒锻炼的前、中期,冬小麦可溶性糖含量与其抗寒性呈显著正相关关系,而抗寒锻炼后期可溶性糖含量与抗寒性无显著负相关。

1.2.3.3 脯氨酸和植物抗寒性的关系

低温胁迫能使植物积累大量脯氨酸,且耐寒性强的植物脯氨酸含量较高,脯氨酸的高亲和力可有效避免组织过度脱水,促进水合反应,维持生物大分子结构和功能的稳定性^[50]。王小华^[51]等人研究发现,脯氨酸可以为植物提供逆境中的氮源和能量,脯氨酸可作为活性氧整合剂中的活性组分,可激活过氧化氢酶、超氧化物酶和多酚氧化酶的活性,从而消除过多的活性氧。陈卫东等^[52]人研究发现,随温度下降,不同苜蓿品种根颈的脯氨酸含量都逐渐升高,经相关分析发, -25℃及-30℃处理下脯氨酸与抗寒性显著负相关。杨德光等^[53]发现低温胁迫使玉米幼苗脯氨酸含量增加。吴雪霞^[54]等研究表明,随着低温胁迫的加剧和低温胁迫持续时间的增加,茄子幼苗叶脯氨酸的含量迅速增加,茄子幼苗的低温耐性得到提高。周杰军等^[55]用六个水稻品种作试材,发现野生稻的抗寒能力极强,脯氨酸含量最高。郭绍川等^[56]用研究证实了植物抗寒性与其脯氨酸含量呈正相关关系,在低温逆境条件下,游离脯氨酸在植株体内大量累积,这说明脯氨酸的含量高低可以间接地预测植物抗寒能力。

1.3 石榴防寒措施研究进展

石榴最宜在温带和亚热带地区种植，喜温暖，怕寒冷，导致石榴冻害最直接的原因是气温骤降和持续低温^[57]，应采取有效的防寒措施，以保证北方地区石榴安全越冬。新疆地区的石榴栽培一般采用匍匐栽培，冬季将石榴树体埋入土中进行防寒处理。而北方其它地区则普遍采取了诸如及时清雪等防寒措施^[58]，以防止积雪引起树枝承重压力过大破裂而引起创伤，且积雪融化时可从枝干四周吸收热量而使树体局部气温下降，使树体冻伤加重，树盘下面的积雪也需在化雪之前及时清除，以避免雪融化吸热导致树体周围剧烈降温；冷空气来袭前用草帘、稻草和玉米秸秆将石榴树干扎紧，并用塑料布把整棵树包裹保护，在树干底部培土堆以保温树体；在低温冷空气和大雪来临前的晴夜里，烧掉果园里的树叶、枝条、杂草，谷壳和草皮泥等，点火造烟提高果园温度^[59]。根颈作为石榴树中活动时间最早、停止生长时间最迟且养分积累较少的部位，抗寒力差，最易遭受冻害，此在根颈部培土也是常见的物理保护措施，一般培土高 40 到 50 cm，但是，要等到来年春季气候转暖的时候，及时撤土，让根颈外露，否则根系很容易长出新芽，使养分大量浪费，不利于石榴的生长^[60]。

李敏^[61]指出，要保证 100% ‘突尼斯软籽’石榴无冻害现象，最有效的物理防护措施是设施温室保护栽培和将石榴地上部弯曲后完全埋土；采用耐寒砧木嫁接育苗，能有效提高石榴自身抗寒能力以达到保护作用；在落叶前喷洒 3 次以上的 PP_{333} 及 KH_2PO_4 ，对 ‘突尼斯软籽’石榴冻旱防治效果明显；防治 ‘突尼斯软籽’石榴冻旱，将物理和化学防护措施结合起来，效果显著。朱桢桢等^[62]认为 ‘突尼斯软籽’石榴栽植 1~2 年后即可于封冻前 15d 进行埋土防寒，或将塑料编织袋套在树苗上再将土填入袋中，待翌年春季温度回升时，将埋土清除，于石榴在其定植后的第 3 年表现出了相对较强的生命力，因此可以采用相对简单的防冻措施，只要在每年 11 月将树干涂白，以防冻害。冯一峰^[63]等以设施塑料大棚栽培的 2 年生 ‘突尼斯软籽’石榴为试材，采用三种不同防寒措施对软籽石榴防寒，研究其对软籽石榴根系附近土壤温度、植株生长状况及渗透调节物质含量的影响规律，结果表明：秸秆加黑膜防寒效果最好，秸秆加棉被次之，覆土最差；秸秆加棉被和秸秆加黑膜处理植株死亡率最低，覆土和秸秆加棉被处理枝条均出现不同程度霉烂现象，秸秆加棉被处理新梢抽干率较低。唐海霞^[64]等人认为，简易设施栽培可以确保石榴安全过冬，‘突尼斯软籽’石榴可以在棚膜保护下安全过冬，一般包裹防寒效果不佳；不同种植方式下 ‘泰山红’耐寒能力大小依次为大棚内>大棚南部>大棚北部，因此在冻害多发地区石榴种植应尽量采用设施栽培；不具备设施栽培条件且气温不致造成大范围冻害时，除选用抗寒品种以外，可在树北侧加设防风墙御寒。柴丽娜等^[65]建议露地栽植的 1~2 年的 ‘突尼斯软籽’石榴幼苗，可以采用以防冻棉缠裹树干的方法防寒越冬，根据树干高度确定防冻棉的长度，

防冻棉缠裹树干后，在石榴苗根颈部覆土 30~40 cm。

1.4 石榴抗寒性研究进展

石榴是一种喜温畏寒的亚热带植物，在低温气候条件下容易发生冻害，冻害原因包括但不限于寒潮降温、持续低温、霜冻及“倒春寒”等^[66]，而深秋冬初寒潮降温及冬末早春“倒春寒”则是造成其危害的重要原因^[67]。在-15℃以下时，石榴易遭受冻害，-19℃是其露地越冬的临界低温^[68]。毕润霞等^[69]从山东枣庄的峰城青皮石榴无性系里选育出具有抗寒性的石榴新品种碧榴。杨雪梅等^[70]研究表明，随着温度的降低，不同品种石榴枝条的相对电导率、MDA 和 POD 活性逐渐升高，SOD 活性及 CAT 活性则先升高后降低。Soloklui 等^[71]研究表明，随着低温胁迫的加剧，石榴的抗寒性与可溶性糖之间的相关性显著高于脯氨酸，同时其电导率、MDA 含量以及脯氨酸含量均呈现出上升的趋势。罗华等^[72]用人工模拟低温胁迫环境，研究发现 9 个石榴新品种在低温胁迫下 MDA、Pro 含量变化不断上升，并采用隶属函数综合法对石榴的抗寒性进行评价。王庆军等^[73]通过人工模拟低温的方式，于室温、0、-4、-8、-12、-16、-20℃条件下对 24 个石榴品种进行了抗寒性综合评价，研究发现随胁迫温度下降，24 个石榴品种 1 年生枝条的相对电导率、脯氨酸和丙二醛含量总体整体呈上升趋势，‘突尼斯软籽’石榴的半致死温度最高，达到了-7.95℃，且其抗寒能力最差。刘贝贝等^[74]对 6 个石榴品种的枝条进行了-4、-8、-12、-16、-20℃的低温处理，结果表明‘三白’是束缚水/自由水比值最大的品种，而‘突尼斯软籽’则是最小的品种；随着低温胁迫加剧，6 个石榴品种的 REC、Pro 含量、可溶性糖含量、SOD 活性、MDA 含量均呈上升趋势，然而一旦温度超过调节范围，这些指标就会逐渐下降。为了全面评估 6 个石榴品种的抗寒性，采用隶属函数法进行了综合评价，从而得出 6 个石榴品种抗寒性的强弱。

1.5 研究目的与意义

目前，对石榴各品种的抗寒性已进行了较全面的研究，但研究采用的温度梯度过大，进而影响试验精确度，而对于石榴低温条件下所能够承受的低温胁迫持续时间则被忽略。通过生产实践发现，植物在短暂低温下可以恢复生长，除非遭遇持续低温。针对新疆石榴在生产过程中所遇到的实际问题，本试验以休眠期的 1 年生‘突尼斯软籽’石榴和 1 年生‘叶城酸石榴’的枝条为试验材料，通过观察不同低温胁迫条件下，各个品种石榴不同时间枝条生理指标变化，旨在找出各品种石榴在不同低温下的最长耐受时间，为在其他地区引种栽培及推广应用提供借鉴和依据，并通过对新疆图木舒