

# 扁桃品种耐旱性评价及干旱胁迫下茎木质部自然栓塞度和解剖结构的比较

于秋红<sup>1</sup>, 木巴热克·阿尤普<sup>2</sup>, 许盼云<sup>2</sup>, 龚 鹏<sup>2</sup>, 迪利夏提·哈斯木<sup>1,①</sup>

(1. 新疆农业大学生命科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院园艺作物研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091)

**摘要:**以厚壳甜扁桃品种‘大巴旦’(*A. communis* var. *typica* ‘Dabadan’)、厚壳甜扁桃品种‘石头巴旦’(*A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’)、软壳甜仁扁桃品种‘公巴旦’(*A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’)和苦扁桃品种‘苦巴旦’(*A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’)(分别简称‘大巴旦’、‘石头巴旦’、‘公巴旦’和‘苦巴旦’)的2年生实生苗为研究材料,比较干旱胁迫(土壤含水量保持在田间最大持水量的20%~40%)35 d 4个扁桃品种的叶片解剖结构和相对含水量,在此基础上,采用隶属函数法评价各扁桃品种的耐旱性,并比较干旱胁迫35 d 4个扁桃品种茎木质部的自然栓塞度和解剖结构。结果表明:干旱胁迫下,多数叶片解剖结构指标和相对含水量在不同扁桃品种间差异不显著;‘公巴旦’茎木质部的自然栓塞度、导管平均面积和连接导管壁厚度显著( $p < 0.05$ )高于另3个扁桃品种,剩余茎木质部解剖结构指标在多数扁桃品种间差异不显著。与对照(土壤含水量保持在田间最大持水量的75%~80%)相比,干旱胁迫下‘公巴旦’的叶片厚度、上表皮角质层厚度、下表皮细胞厚度、侧脉维管束占比、叶肉细胞紧实度和叶片相对含水量显著下降,但叶肉细胞孔隙度显著升高;而干旱胁迫下另3个扁桃品种多数叶片解剖结构指标与对照的差异不显著。干旱胁迫下4个扁桃品种茎木质部解剖结构指标与对照的差异不显著,茎木质部自然栓塞度却显著高于对照,其中,‘公巴旦’茎木质部自然栓塞度的增幅最高(208.28%)。前4个主成分的累计贡献率为81.938%,4个主成分中载荷量绝对值最高的指标分别为叶肉细胞紧实度、上表皮角质层厚度、下表皮角质层厚度、叶片相对含水量。基于上述4个指标,‘大巴旦’、‘石头巴旦’、‘公巴旦’和‘苦巴旦’的平均隶属函数值分别为0.544 8、0.523 8、0.511 9和0.464 2。综上所述,4个扁桃品种均有一定的耐旱能力,其中,‘大巴旦’的耐旱性最强,‘苦巴旦’的耐旱性最弱;‘公巴旦’茎木质部对干旱胁迫最敏感,在干旱胁迫环境中容易发生栓塞。

**关键词:**扁桃;耐旱性;茎木质部;自然栓塞度;解剖结构;隶属函数法

中图分类号: Q948.112+.3; Q945.78; S662.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2022)06-0015-10  
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.06.02

**Drought tolerance evaluation of almond cultivars and comparison on stem xylem natural embolism degree and anatomical structure under drought stress** YU QiuHong<sup>1</sup>, Mubareke AYOUPU<sup>2</sup>, XU Panyun<sup>2</sup>, GONG Peng<sup>2</sup>, Dilixiati HASIMU<sup>1,①</sup> (1. College of Life Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Institute of Horticultural Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2022, 31(6): 15-24

**Abstract:** Taking two-year-old seedlings of *Amygdalus communis* var. *typica* ‘Dabadan’, *A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’, *A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’, and *A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’ (‘Dabadan’, ‘Shitoubadan’, ‘Gongbadan’, and ‘Kubadan’ for short, respectively) as research materials, the leaf anatomical structures and relative moisture content of four almond cultivars

收稿日期: 2022-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31860538); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2022D01A90); 中央引导地方科技发展专项资金项目; 巴旦姆(扁桃)研究所技术服务合作项目(2022650001000041)

作者简介: 于秋红(1998—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要从事植物逆境生理方面的研究工作。

①通信作者 E-mail: 910421543@qq.com

引用格式: 于秋红, 木巴热克·阿尤普, 许盼云, 等. 扁桃品种耐旱性评价及干旱胁迫下茎木质部自然栓塞度和解剖结构的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(6): 15-24.

under drought stress (soil moisture content maintained at 20%–40% of the maximum moisture content in field) for 35 d were compared, on the basis, the drought tolerance of each almond cultivar was evaluated by using subordinate function method, and the natural embolism degree and anatomical structures of stem xylem of four almond cultivars under drought stress for 35 d were compared. The results show that under drought stress, the differences in most leaf anatomical structure indexes and relative moisture content among different almond cultivars are not significant; the natural embolism degree, mean vessel area, and intervessel wall thickness of stem xylem of ‘Gongbadan’ are significantly ( $p < 0.05$ ) higher than those of the other three almond cultivars, while the rest stem xylem anatomical structure indexes are not significantly different among most almond cultivars. Compared with the control (soil moisture content maintained at 75%–80% of the maximum moisture content in field), leaf thickness, upper epidermis cuticle thickness, lower epidermis cell thickness, proportion of vascular bundle of lateral vein, mesophyll cell tightness, and relative moisture content in leaf of ‘Gongbadan’ under drought stress decrease significantly, but its mesophyll cell porosity increases significantly; while the differences in most leaf anatomical structure indexes of the other three almond cultivars under drought stress are not significant with those of the control. There is no significant difference in stem xylem anatomical structure indexes of four almond cultivars between drought stress and the control, but the natural embolism degree of stem xylem is significantly higher than that of the control, in which, the increment of natural embolism degree of stem xylem of ‘Gongbadan’ is the highest (208.28%). The cumulative contribution rate of the first four principal components is 81.938%, and indexes with the highest absolute values of load of four principal components are mesophyll cell tightness, upper epidermis cuticle thickness, lower epidermis cuticle thickness, and relative moisture content in leaf, respectively. Based on the four above-mentioned indexes, the mean subordinate function values of ‘Dabadan’, ‘Shitoubadan’, ‘Gongbadan’, and ‘Kubadan’ are 0.544 8, 0.523 8, 0.511 9, and 0.464 2, respectively. Taken together, the four almond cultivars all have some drought tolerance, in which, the drought tolerance of ‘Dabadan’ is the strongest, and that of ‘Kubadan’ is the weakest; the stem xylem of ‘Gongbadan’ is most sensitive to drought stress, and it is easy to occur embolism under drought stress environment.

**Key words:** almond; drought tolerance; stem xylem; natural embolism degree; anatomical structure; subordinate function method

扁桃(*Amygdalus communis* Linn.)又名巴旦杏、巴旦姆,为蔷薇科(Rosaceae)桃属(*Amygdalus* Linn.)乔木或灌木,是世界四大著名干果之一。扁桃仁富含脂肪和苦杏仁酶等成分,是食品、制药工业的重要原料。新疆是世界扁桃的起源中心之一,也是中国扁桃的惟一主产区。经过国内农业科技人员多年的不懈努力,中国的扁桃栽培技术已经取得了较大的进步<sup>[1,2]</sup>,但是“产量低”仍然制约着中国扁桃产业的发展。

干旱是影响植物生长发育的常见非生物胁迫因子之一<sup>[3]</sup>。新疆地区普遍干旱,评价和筛选抗旱扁桃一直是新疆地区扁桃育种工作的重要方向。虽然国内研究者已经对蒙古扁桃[*A. mongolica* (Maxim.) Ricker]、野生扁桃(*A. ledebouriana* Schltdl.)和长柄扁桃(*A. pedunculata* Pall.)等的耐旱生理、解剖结构及分子机制等进行了研究<sup>[4]1-123,[5-10]</sup>,但尚未筛选出优质的高抗旱扁桃资源。

木质部栓塞(xylem embolism)指木本植物在干旱条件下产生的木质部导管输水功能障碍现象,是影响

植物正常生长发育的一个重要因子<sup>[11]</sup>。陆世通等<sup>[12]</sup>认为,罗汉松科(Podocarpaceae)3种植物根的木质部结构与输水效率和栓塞抗性的关系是权衡其水分运输效率与安全的基础;方菁等<sup>[13]</sup>认为,在自然生境中,植物通过增大导管直径提高其输水效率,从而避免水势下降,降低栓塞风险;黄恺翔等<sup>[14]</sup>发现,输水效率低的树种需要构建导管壁厚度较大的木质部以降低栓塞风险,且不同生境或分类单元植物的木质部结构可能具有特异性;Kaack等<sup>[15]</sup>发现,木质部结构与栓塞程度有很强的关联。由此可见,木质部栓塞特性与植物耐旱性关系密切,探明植物木质部栓塞程度对于分析其耐旱性具有重要意义。

鉴于此,作者以厚壳甜扁桃品种‘大巴旦’(*A. communis* var. *typica* ‘Dabadan’,简称‘大巴旦’)、厚壳甜扁桃品种‘石头巴旦’(*A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’,简称‘石头巴旦’)、软壳甜扁桃品种‘公巴旦’(*A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’,简称‘公巴旦’)和苦扁桃品种‘苦巴旦’(*A. communis* var.

*amara* ‘Kubadan’,简称‘苦巴旦’)的2年生实生苗为研究材料,通过盆栽实验比较4个扁桃品种叶片解剖结构和相对含水量在干旱胁迫35 d的变化,在此基础上分析各扁桃品种的耐旱性,并对干旱胁迫35 d 4个扁桃品种茎木质部的自然栓塞度和解剖结构进行比较,以期明确这4个扁桃品种的耐旱性,为在新疆地区选育扁桃耐旱材料以及深入了解扁桃的耐旱策略提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

‘大巴旦’、‘石头巴旦’、‘公巴旦’和‘苦巴旦’的2年生实生苗均于2021年4月初种植在新疆农业科学院园艺作物研究所实验基地(东经87°34′47″、北纬43°49′13″)。幼苗均种植在直径25 cm、高32 cm

的圆柱形花盆中,每盆1株。栽培土壤以沙土和沙壤土为主,土壤中有有机质含量为207.74 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为6.62 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量为0.80 g·kg<sup>-1</sup>,全钾含量为15.45 g·kg<sup>-1</sup>,pH 7.55。利用透光防雨棚遮挡雨水,每周浇1次水,每次每盆浇水2.5 L。

### 1.2 方法

1.2.1 干旱胁迫处理 于2021年7月10日,在每个品种各选取30株样株进行干旱胁迫处理。供试样株的基本情况见表1。将每个品种的样株平均分成2组,一组为对照组(CK),即正常灌溉,土壤含水量保持在田间最大持水量的75%~80%;另一组为干旱胁迫组(DS),土壤含水量保持在田间最大持水量的20%~40%<sup>[11]</sup>。实验前采用烘干法测定土壤容重;实验期间,每2 d使用SM150T便携式土壤水分速测仪(英国Delta公司)测定1次土壤电导率,参照仪器使用说明书计算土壤含水量。整个实验持续35 d。

表1 供试扁桃品种样株的基本情况

Table 1 Basic situations of test samplings of almond cultivars

品种 <sup>1)</sup> Cultivar <sup>1)</sup>	株高/cm Plant height	基径/mm Basal diameter	侧枝长度/cm Lateral branch length	侧枝直径/mm Lateral branch diameter	单株叶片数 Leaf number per plant	平均叶长/cm Average leaf length	平均叶宽/cm Average leaf width	平均叶柄长/cm Average petiole length
C1	43.69±1.19	6.21±0.35	14.01±0.66	2.15±0.06	282±22	3.88±0.05	1.21±0.02	0.59±0.01
C2	46.17±1.35	6.42±0.35	14.77±0.55	3.00±0.69	217±70	3.72±0.07	1.08±0.03	0.51±0.01
C3	40.50±1.52	8.15±0.27	14.49±0.84	2.62±0.11	204±11	6.29±0.79	1.77±0.05	0.84±0.03
C4	46.62±2.43	7.07±0.24	16.50±0.89	2.32±0.07	217±19	3.87±0.06	1.36±0.03	0.76±0.04

<sup>1)</sup> C1: 厚壳甜扁桃品种‘大巴旦’*Amygdalus communis* var. *typica* ‘Dabadan’; C2: 厚壳甜扁桃品种‘石头巴旦’*A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’; C3: 软壳甜扁桃品种‘公巴旦’*A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’; C4: 苦扁桃品种‘苦巴旦’*A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’.

1.2.2 叶片解剖结构观测 实验结束当天6:00,在每株样株树冠的中部随机采集完全展开的成熟叶片3或4枚,将同一品种的同组叶片混匀。随机选取10枚叶片,采用称重法<sup>[16]</sup>测定叶片相对含水量。其余叶片以主脉为中心,用打孔器在基部向上第4或第5个侧脉处取直径6 mm的圆形叶块,放入FAA固定液[V(体积分数50%乙醇):V(乙酸):V(甲醛)=90:5:5]中浸泡2~3个月,采用番红-固绿染色法<sup>[7,17,18]</sup>制成石蜡切片,切片厚度8~10 μm。每个品种对照组和干旱胁迫组各随机选取5个切片,使用Olympus BX51光学显微镜(日本Olympus公司)进行观察和拍照,参照相关文献<sup>[6,7,11]</sup>、采用Image-J图像处理软件测量叶片厚度、上表皮角质层厚度、上表皮细胞厚度、下表皮角质层厚度、下表皮细胞厚度、栅栏细胞厚度、侧脉维管束总面积、维管束鞘总面积、叶肉

细胞总面积、单位面积内叶肉细胞间空隙总面积和近轴面叶肉细胞总面积,计算侧脉维管束占比、叶肉细胞孔隙度和叶肉细胞紧实度,计算公式分别为侧脉维管束占比=[(侧脉维管束总面积+维管束鞘总面积)/叶肉细胞总面积]×100%、叶肉细胞孔隙度=(单位面积内叶肉细胞间空隙总面积/近轴面叶肉细胞总面积)×100%和叶肉细胞紧实度=(栅栏细胞厚度/叶片厚度)×100%。

1.2.3 茎木质部自然栓塞度测定 实验结束当天6:00,在每个品种的对照组和干旱胁迫组中各选取长势基本一致且主茎直径6~8 mm的样株5株;剪取样株主茎的地上部分,在主茎上部套上黑色塑料袋,底部置于水中;在水中切除枝条基部2~3 cm的茎段,并切取主茎中部长约20 cm的茎段,使用XYLEM木质部导水率及栓塞测量系统测定起始导水率( $K_0$ )和

最大导水率 ( $K_{\max}$ ), 据此计算茎木质部自然栓塞度 (NPLC) [11,19]。在 0.5~1.0 kPa 条件下, 使用孔径 0.22  $\mu\text{m}$  的过滤器、利用矿泉水 (含  $1.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{K}^+$ 、 $5.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}^+$ 、 $7.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Ca}^{2+}$  和  $1.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Mg}^{2+}$ ) [20] 测定  $K_0$  值; 在 0.2 MPa 条件下, 利用矿泉水排出栓塞导管内的气泡, 直至枝条导管内无气泡溢出, 然后在 0.5~1.0 kPa 条件下再次测定木质部导水率, 即  $K_{\max}$  值。NPLC 计算公式为  $\text{NPLC} = (1 - K_0 / K_{\max}) \times 100\%$ 。

1.2.4 茎木质部解剖结构观测 自然栓塞度测定完毕后, 切取茎段中部长度 1~2 cm 的小段, 采用番红-固绿染色法制成石蜡切片, 切片厚度 8~10  $\mu\text{m}$ 。每个品种对照组和干旱胁迫组各随机选取 5 个切片, 使用 Olympus BX51 光学显微镜进行观察和拍照, 参考相关文献 [21]、采用 Image-J 图像处理软件测量木质部导管直径、导管平均面积、连接导管壁厚度、单导管指数、导管密度、导管组指数、导管壁理论机械强度、导管水力直径、木材密度。在剩余茎段中部切取长度 5~10 mm 的小段, 参考 Jansen 等 [22] 的方法在不同浓度梯度的乙醇溶液中脱水, 于室内自然风干, 将样品纵切后固定在样品架上, 喷白金 3 min; 采用 Zeiss Supar 55 (VP) 扫描电子显微镜 (德国 Carl Zeiss 公司) 在 2 kV 电压下观察纹孔膜结构并拍照, 参考相关文献 [21]、采用 Image-J 图像处理软件测量纹孔膜面积和纹孔膜直径。

### 1.3 数据处理与分析

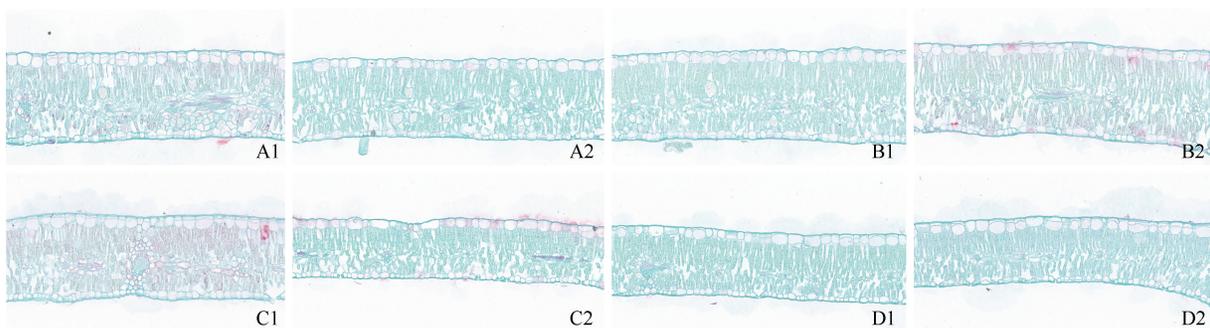
利用 EXCEL 2010 和 SPSS 19.0 软件完成实验数

据处理和作图。采用 LSD 多重比较法分析不同品种或不同组间各指标的差异; 目前, 基于叶片解剖结构的植物耐旱性评价方法较为成熟 [6,23,24], 故采用隶属函数法 [5] 对 4 个扁桃品种的叶片解剖结构指标进行分析, 并对其耐旱性进行评价。对对照组和干旱胁迫组不同扁桃品种叶片解剖结构指标和相对含水量进行主成分分析 [25], 根据各指标的载荷量筛选耐旱性评价指标, 据此计算对照组和干旱胁迫组不同品种各耐旱性评价指标的隶属函数值, 通过各品种的平均隶属函数值判断其耐旱性 [4] [24] [10]。隶属函数值越大, 表示耐旱性越强。

## 2 结果和分析

### 2.1 干旱胁迫下不同扁桃品种叶片解剖结构和相对含水量的比较

2.1.1 叶片解剖结构的共同特征 显微观察结果 (图 1) 表明: ‘大巴旦’、‘石头巴旦’、‘公巴旦’ 和 ‘苦巴旦’ 的 2 年生实生苗叶片解剖结构具有一定的共同特征, 主要表现为: 1) 上、下表皮细胞均为 1 层, 且表皮细胞排列紧密, 外部附有 1 层较薄的角质层; 2) 叶肉细胞由栅栏组织、海绵组织、维管束和晶细胞组成, 且细胞排列紧密; 3) 栅栏组织较为发达, 常为 3~6 层, 在叶片靠近上、下表皮处均有分布, 细胞分别呈长柱形和短柱形, 且靠近上表皮的栅栏组织细胞排列更紧密; 4) 主脉具有维管束, 且薄壁细胞中伴有粘液细胞和少量晶细胞。



A: 厚壳甜扁桃品种 ‘大巴旦’ *Amygdalus communis* var. *typica* ‘Dabadan’; B: 厚壳甜扁桃品种 ‘石头巴旦’ *A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’; C: 软壳甜扁桃品种 ‘公巴旦’ *A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’; D: 苦扁桃品种 ‘苦巴旦’ *A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’. 1: 对照组 (土壤含水量保持在田间最大持水量的 75%~80%) The control group (soil moisture content maintained at 75%~80% of the maximum moisture content in field); 2: 干旱胁迫组 (土壤含水量保持在田间最大持水量的 20%~40%) Drought stress group (soil moisture content maintained at 20%~40% of the maximum moisture content in field).

图 1 干旱胁迫下 4 个扁桃品种的叶片解剖结构

Fig. 1 Leaf anatomical structure of four almond cultivars under drought stress

2.1.2 叶片解剖结构差异 从对照组(土壤含水量保持在田间最大持水量的75%~80%)4个扁桃品种叶片解剖结构指标的统计结果(表2)看,‘大巴旦’的叶片厚度、上表皮细胞厚度、下表皮细胞厚度和叶肉细胞紧实度均最高,且其上表皮细胞厚度和叶肉细胞紧实度显著( $p<0.05$ )高于其他品种;其叶肉细胞孔隙度最低,但仅显著低于‘苦巴旦’。‘公巴旦’的上表皮角质层厚度、下表皮角质层厚度和侧脉维管束占比均最高,且其上表皮角质层厚度显著高于‘石头巴旦’和‘苦巴旦’,其下表皮角质层厚度显著高于‘石头巴旦’;其上表皮细胞厚度最低,但仅显著低于‘大巴旦’。‘苦巴旦’的叶片厚度、下表皮细胞厚度和叶肉细胞紧实度均最低,其中,叶片厚度和叶肉细胞紧实度显著低于‘大巴旦’,但与‘石头巴旦’和‘公巴旦’差异不显著,而下表皮细胞厚度显著低于其他品种。值得注意的是,侧脉维管束占比在4个扁桃品种间的差异均不显著。

从干旱胁迫组(土壤含水量保持在田间最大持水量的20%~40%)4个扁桃品种叶片解剖结构指标的统计结果(表2)看,4个扁桃品种间的多数叶片解剖结构指标差异不显著。‘大巴旦’的下表皮细胞厚度、叶肉细胞孔隙度和叶肉细胞紧实度均最高,且其下表皮细胞厚度显著高于‘苦巴旦’,叶肉细胞孔隙度显著高于‘石头巴旦’,叶肉细胞紧实度显著高于‘公巴旦’和‘苦巴旦’;其上表皮细胞厚度和下表皮角质层厚度最低,且其下表皮角质层厚度显著低于‘石头巴旦’。‘石头巴旦’的叶片厚度、上表皮角质层厚度、下表皮角质层厚度和侧脉维管束占比均最高,且其叶片厚度显著高于‘公巴旦’和‘苦巴旦’,下表皮角质层厚度显著高于‘大巴旦’。‘公巴旦’的上表皮角质层厚度和叶肉细胞紧实度均最低,且其叶肉细胞紧实度显著低于‘大巴旦’和‘石头巴旦’。‘苦巴旦’的上表皮细胞厚度最高;其叶片厚度、下表皮细胞厚度和侧脉维管束占比均最低,且叶片厚度和下

表2 干旱胁迫下4个扁桃品种叶片解剖结构和相对含水量的差异( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Difference in anatomical structure and relative moisture content in leaves of four almond cultivars under drought stress ( $\bar{X}\pm SE$ )<sup>1)</sup>

品种 <sup>2)</sup> Cultivar <sup>2)</sup>	叶片厚度/ $\mu\text{m}$ Leaf thickness		上表皮角质层厚度/ $\mu\text{m}$ Upper epidermis cuticle thickness		上表皮细胞厚度/ $\mu\text{m}$ Upper epidermis cell thickness	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS
C1	267.05 $\pm$ 4.36a	261.86 $\pm$ 6.66a	4.09 $\pm$ 0.25ab	3.57 $\pm$ 0.39a	37.88 $\pm$ 1.36a	32.43 $\pm$ 0.69a *
C2	229.89 $\pm$ 13.31b	267.10 $\pm$ 9.39a	3.45 $\pm$ 0.31b	4.15 $\pm$ 0.35a	32.51 $\pm$ 0.89b	33.91 $\pm$ 1.51a
C3	243.49 $\pm$ 5.50ab	213.61 $\pm$ 5.05b *	4.28 $\pm$ 0.14a	3.41 $\pm$ 0.30a *	32.39 $\pm$ 1.05b	32.54 $\pm$ 1.76a
C4	226.90 $\pm$ 15.22b	211.75 $\pm$ 6.46b	3.48 $\pm$ 0.29b	3.59 $\pm$ 0.14a	32.59 $\pm$ 1.29b	35.07 $\pm$ 1.37a
品种 <sup>2)</sup> Cultivar <sup>2)</sup>	下表皮角质层厚度/ $\mu\text{m}$ Lower epidermis cuticle thickness		下表皮细胞厚度/ $\mu\text{m}$ Lower epidermis cell thickness		侧脉维管束占比/% Proportion of vascular bundle of lateral vein	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS
C1	3.78 $\pm$ 0.25ab	3.42 $\pm$ 0.25b	21.33 $\pm$ 0.98a	19.42 $\pm$ 0.67a	16.27 $\pm$ 0.02a	12.96 $\pm$ 0.02a
C2	3.47 $\pm$ 0.24b	4.56 $\pm$ 0.34a *	19.41 $\pm$ 0.90a	19.26 $\pm$ 1.26a	15.19 $\pm$ 0.02a	13.57 $\pm$ 0.01a
C3	4.30 $\pm$ 0.15a	4.03 $\pm$ 0.39ab	20.45 $\pm$ 0.65a	18.02 $\pm$ 0.55ab *	18.73 $\pm$ 0.02a	12.68 $\pm$ 0.01a *
C4	3.71 $\pm$ 0.34ab	3.78 $\pm$ 0.14ab	15.85 $\pm$ 0.39b	16.47 $\pm$ 0.50b	16.74 $\pm$ 0.01a	11.19 $\pm$ 0.01a *
品种 <sup>2)</sup> Cultivar <sup>2)</sup>	叶肉细胞孔隙度/% Mesophyll cell porosity		叶肉细胞紧实度/% Mesophyll cell tightness		叶片相对含水量/% Relative moisture content in leaf	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS
C1	15.06 $\pm$ 0.01b	28.26 $\pm$ 0.02a *	67.89 $\pm$ 0.04a	59.89 $\pm$ 0.01a	78.63 $\pm$ 5.57a	67.07 $\pm$ 2.11a *
C2	16.02 $\pm$ 0.04b	21.67 $\pm$ 0.02b	55.32 $\pm$ 0.02b	57.31 $\pm$ 0.01a	77.07 $\pm$ 6.16a	68.58 $\pm$ 3.60a
C3	16.76 $\pm$ 0.02b	26.88 $\pm$ 0.05ab *	57.49 $\pm$ 0.01b	51.36 $\pm$ 0.01b *	82.20 $\pm$ 2.91a	65.43 $\pm$ 4.01a *
C4	29.15 $\pm$ 0.04a	27.26 $\pm$ 0.01ab	50.90 $\pm$ 0.02b	52.39 $\pm$ 0.02b	79.95 $\pm$ 3.53a	70.11 $\pm$ 0.71a *

<sup>1)</sup> CK: 对照组(土壤含水量保持在田间最大持水量的75%~80%) The control group (soil moisture content maintained at 75%~80% of the maximum moisture content in field); DS: 干旱胁迫组(土壤含水量保持在田间最大持水量的20%~40%) Drought stress group (soil moisture content maintained at 20%~40% of the maximum moisture content in field). 同列中不同小写字母表示同一指标在不同品种间差异显著( $p<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $p<0.05$ ) difference in the same index among different cultivars. \*: 表示同一指标在干旱胁迫组与对照组间差异显著( $p<0.05$ ) Indicating the significant ( $p<0.05$ ) difference in the same index between drought stress group and the control group.

<sup>2)</sup> C1: 厚壳甜扁桃品种‘大巴旦’ *Amygdalus communis* var. *typica* ‘Dabadan’; C2: 厚壳甜扁桃品种‘石头巴旦’ *A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’; C3: 软壳甜扁桃品种‘公巴旦’ *A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’; C4: 苦扁桃品种‘苦巴旦’ *A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’.

表皮细胞厚度显著低于‘大巴旦’和‘石头巴旦’。值得注意的是,上表皮角质层厚度、上表皮细胞厚度和侧脉维管束占比在4个扁桃品种间的差异均不显著。

与对照组相比,干旱胁迫组4个扁桃品种的叶片解剖结构存在明显变化,其中,‘大巴旦’和‘公巴旦’的多项叶片解剖结构指标降低。干旱胁迫组‘大巴旦’的上表皮细胞厚度显著低于对照组,叶肉细胞孔隙度显著高于对照组,分别较对照组降低和升高了14.39%和87.65%;‘石头巴旦’仅下表皮角质层厚度显著高于对照组,较对照组升高了31.41%;‘公巴旦’的叶片厚度、上表皮角质层厚度、下表皮细胞厚度、侧脉维管束占比和叶肉细胞紧实度均显著低于对照组,分别较对照组降低了12.27%、20.33%、11.88%、32.30%和10.66%,而叶肉细胞孔隙度显著高于对照组,较对照组升高了60.38%;‘苦巴旦’仅侧脉维管束占比显著低于对照组,较对照组降低了33.15%。

2.1.3 叶片相对含水量差异 由表2还可见:对照组4个扁桃品种的叶片相对含水量为77.07%~82.20%,其中,‘公巴旦’的叶片相对含水量最高,‘石头巴旦’的叶片相对含水量最低,而且4个扁桃品种间的叶片相对含水量差异不显著。干旱胁迫组4个扁桃品种的叶片相对含水量为65.43%~70.11%,以‘苦巴旦’的叶片相对含水量最高,‘公巴旦’的叶片相对含水量最低,而且4个扁桃品种间的叶片相对含水量差异也不显著。与对照组相比,干旱胁迫组4个扁桃品种的叶片相对含水量均降低,其中,‘大巴旦’、‘公巴

旦’和‘苦巴旦’的叶片相对含水量显著低于对照组,分别较对照组降低了14.70%、20.40%和12.31%。

## 2.2 不同扁桃品种的耐旱性评价

2.2.1 主成分分析 基于4个扁桃品种叶片解剖结构指标和相对含水量进行主成分分析,结果见表3。由表3可见:前4个主成分的累计贡献率达到81.938%。在第1主成分中,有6个指标载荷量的绝对值在0.5以上,其中叶肉细胞紧实度载荷量的绝对值最高,为0.837;在第2主成分中,有4个指标载荷量的绝对值在0.5以上,其中上表皮角质层厚度载荷量的绝对值最高,为0.721;在第3主成分中,有2个指标载荷量的绝对值在0.5以上,其中下表皮角质层厚度载荷量的绝对值最高,为0.611;在第4主成分中,除叶片相对含水量外,其余指标载荷量的绝对值均很低。

2.2.2 耐旱性评价 选取上述4个主成分中载荷量绝对值最高的指标(即上表皮角质层厚度、下表皮角质层厚度、叶肉细胞紧实度和叶片相对含水量),采用隶属函数法计算对照组和干旱胁迫组4个扁桃品种各指标的隶属函数值,根据供试扁桃品种4个指标的平均隶属函数值判定其耐旱性,详细结果见表4。由表4可见:4个扁桃品种中,‘大巴旦’的平均隶属函数值最大(0.544 8),‘石头巴旦’和‘公巴旦’的平均隶属函数值较大,‘苦巴旦’的平均隶属函数值最小(0.464 2),说明‘大巴旦’的耐旱性最强,‘苦巴旦’的耐旱性最弱。

表3 基于4个扁桃品种叶片解剖结构和相对含水量的主成分分析

Table 3 Principal component analysis based on anatomical structure and relative moisture content in leaves of four almond cultivars

主成分 Principal component	各指标的载荷量 Load of each index					
	叶片厚度 Leaf thickness	上表皮角质层厚度 Upper epidermis cuticle thickness	上表皮细胞厚度 Upper epidermis cell thickness	下表皮角质层厚度 Lower epidermis cuticle thickness	下表皮细胞厚度 Lower epidermis cell thickness	侧脉维管束占比 Proportion of vascular bundle of lateral vein
1	0.709	0.594	0.669	0.375	0.738	0.101
2	-0.507	0.721	-0.463	0.638	-0.323	0.636
3	0.205	0.211	0.034	0.611	-0.459	-0.546
4	-0.064	-0.011	0.099	-0.059	-0.100	0.103

主成分 Principal component	各指标的载荷量 Load of each index			特征值 Eigen-value	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	叶肉细胞孔隙度 Mesophyll cell porosity	叶肉细胞紧实度 Mesophyll cell tightness	叶片相对含水量 Relative moisture content in leaf			
1	-0.567	0.837	0.115	3.035	33.726	33.726
2	-0.460	-0.102	-0.003	2.130	23.662	57.388
3	0.451	0.150	0.023	1.195	13.277	70.665
4	0.077	0.002	0.985	1.105	11.273	81.938

表 4 基于 4 个叶片指标隶属函数值的 4 个扁桃品种耐旱性评价<sup>1)</sup>  
Table 4 Evaluation of drought tolerance of four almond cultivars based on subordinate function values of four leaf indexes<sup>1)</sup>

品种 Cultivar	对照组指标的隶属函数值 <sup>2)</sup> Subordinate function value of indexes of the control group <sup>2)</sup>				干旱胁迫组指标的隶属函数值 <sup>2)</sup> Subordinate function value of indexes of drought stress group <sup>2)</sup>				ASFV
	UECT	LECT	MCT	RMCL	UECT	LECT	MCT	RMCL	
	C1	0.652 8	0.568 4	0.684 9	0.552 6	0.389 2	0.259 4	0.774 5	
C2	0.723 5	0.424 7	0.316 8	0.451 5	0.608 6	0.732 6	0.601 5	0.645 2	0.523 8
C3	0.723 5	0.810 0	0.394 1	0.778 8	0.330 3	0.514 7	0.248 8	0.294 9	0.511 9
C4	0.419 1	0.532 6	0.187 5	0.638 0	0.397 6	0.412 2	0.312 3	0.814 7	0.464 2

<sup>1)</sup> C1: 厚壳甜扁桃品种‘大巴旦’ *Amygdalus communis* var. *typica* ‘Dabadan’; C2: 厚壳甜扁桃品种‘石头巴旦’ *A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’; C3: 软壳甜扁桃品种‘公巴旦’ *A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’; C4: 苦扁桃品种‘苦巴旦’ *A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’. UECT: 上表皮角质层厚度 Upper epidermis cuticle thickness; LECT: 下表皮角质层厚度 Lower epidermis cuticle thickness; MCT: 叶肉细胞紧密度 Mesophyll cell tightness; RMCL: 叶片相对含水量 Relative moisture content in leaf; ASFV: 平均隶属函数值 Average subordinate function value.  
<sup>2)</sup> 对照组的土壤含水量保持在田间最大持水量的 75%~80% The soil moisture content of the control group maintained at 75%~80% of the maximum moisture content in field; 干旱胁迫组的土壤含水量保持在田间最大持水量的 20%~40% The soil moisture content of drought stress group maintained at 20%~40% of the maximum moisture content in field.

### 2.3 干旱胁迫对不同扁桃品种茎木质部自然栓塞度和解剖结构的影响

2.3.1 对茎木质部自然栓塞度的影响 统计结果(表 5)表明:对照组(土壤含水量保持在田间最大持水量的 75%~80%)‘石头巴旦’茎木质部自然栓塞度最高(20.05%),‘大巴旦’茎木质部自然栓塞度最低(14.20%);对照组 4 个扁桃品种间的茎木质部自然栓塞度差异不显著。干旱胁迫组(土壤含水量保持在田间最大持水量的 20%~40%)‘公巴旦’的木质部自然栓塞度最高(55.83%),且显著高于其他 3 个扁桃品种;‘苦巴旦’的木质部自然栓塞度最低(34.66%),但与‘大巴旦’和‘石头巴旦’的差异不显著。与对照组相比,干旱胁迫组‘大巴旦’、‘石头巴旦’、‘公巴旦’和‘苦巴旦’的木质部自然栓塞度均显著( $p < 0.05$ )升高,增幅分别为 166.34%、104.09%、208.28%和 80.43%。由此可见,干旱胁迫对 4 个扁桃品种木质部自然栓塞度的影响程度从大到小依次为‘公巴旦’、‘大巴旦’、‘石头巴旦’、‘苦巴旦’。

2.3.2 对茎木质部解剖结构的影响 根据对照组和干旱胁迫组 4 个扁桃品种茎木质部的解剖结构观察

(图 2)和统计结果(表 5),4 个扁桃品种的茎木质部解剖结构在干旱胁迫前后未发生明显变化,说明实验设置的干旱胁迫条件并没有对 4 个扁桃品种茎木质部的解剖结构造成严重影响。

从对照组 4 个扁桃品种茎木质部解剖结构指标的统计结果(表 5)看,‘大巴旦’的单导管指数最高,导管直径、导管平均面积、导管组指数、导管水力直径和木材密度最低;‘石头巴旦’的连接导管壁厚度和导管壁理论机械强度最低;‘公巴旦’的导管直径、导管平均面积、连接导管壁厚度、导管组指数、导管壁理论机械强度和导管水力直径最高,单导管指数、导管密度、纹孔膜面积和纹孔膜直径最低;‘苦巴旦’的导管密度、木材密度、纹孔膜面积和纹孔膜直径最高。总体来看,对照组 4 个扁桃品种间的多数木质部解剖结构指标差异不显著。

从干旱胁迫组 4 个扁桃品种茎木质部解剖结构指标的统计结果(表 5)看,‘大巴旦’的导管组指数最高,导管平均面积、单导管指数、导管水力直径和木材密度最低;‘石头巴旦’的单导管指数和导管水力直径最高,连接导管壁厚度、导管组指数、导管壁理论

表 5 干旱胁迫对 4 个扁桃品种茎木质部自然栓塞度和解剖结构的影响( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>  
Table 5 Effect of drought stress on natural embolism degree and anatomical structure of stem xylem of four almond cultivars ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

品种 <sup>2)</sup> Cultivar <sup>2)</sup>	自然栓塞度/% Natural embolism degree		导管直径/ $\mu\text{m}$ Vessel diameter		导管平均面积/ $\mu\text{m}^2$ Mean vessel area		连接导管壁厚度/ $\mu\text{m}$ Intervessel wall thickness	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS	CK	DS
	C1	14.20±4.57a	37.82±7.29b *	19.813±0.665a	19.529±0.667a	18.526±5.112a	20.175±1.761b	2.946±0.218ab
C2	20.05±6.67a	40.92±14.30b *	20.185±0.443a	20.409±0.287a	24.525±3.363a	23.814±2.820b	2.830±0.063b	3.003±0.164b
C3	18.11±6.87a	55.83±14.67a *	22.764±2.927a	22.712±1.571a	30.918±4.478a	35.120±0.174a	3.619±0.261a	3.828±0.027a
C4	19.21±10.92a	34.66±8.11b *	20.942±0.818a	19.196±1.464a	21.187±3.031a	21.356±2.171b	3.217±0.098ab	3.122±0.078b

续表5 Table 5 (Continued)

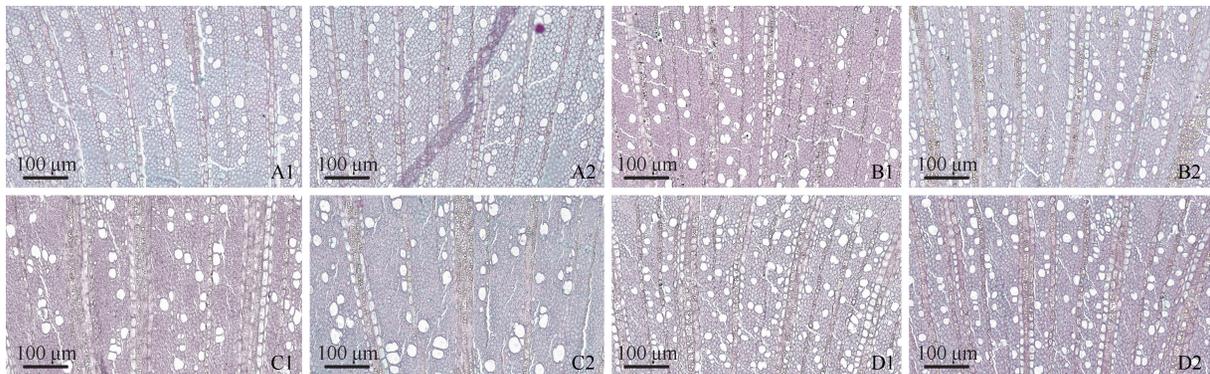
品种 <sup>2)</sup> Cultivar <sup>2)</sup>	单导管指数 Solitary vessel index		导管密度/mm <sup>-2</sup> Vessel density		导管组指数 Vessel grouping index		导管壁理论机械强度 Theoretical vessel implosion resistance	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS	CK	DS
C1	0.841±0.013a	0.806±0.017a	156.280±5.239ab	132.067±2.558ab	1.225±0.024a	1.276±0.010a	0.022±0.002a	0.028±0.001a
C2	0.821±0.001a	0.814±0.046a	144.621±4.746bc	119.850±0.041b	1.230±0.002a	1.252±0.056a	0.020±0.000a	0.022±0.002a
C3	0.779±0.030a	0.808±0.029a	137.133±3.754c	119.115±15.328b	1.313±0.052a	1.268±0.025a	0.026±0.003a	0.029±0.004a
C4	0.815±0.035a	0.808±0.004a	161.164±0.214a	171.916±17.245a	1.261±0.038a	1.256±0.008a	0.024±0.003a	0.027±0.003a

品种 <sup>2)</sup> Cultivar <sup>2)</sup>	导管水力直径/μm Hydraulic diameter of vessel		木材密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) Wood density		纹孔膜面积/μm <sup>2</sup> Pit membrane area		纹孔膜直径/μm Pit membrane diameter	
	CK	DS	CK	DS	CK	DS	CK	DS
C1	35.431±2.655a	39.312±2.266a	0.730±0.025a	0.725±0.022b	17.517±0.686a	15.799±0.711b	4.715±0.093a	4.472±0.102b
C2	39.833±0.367a	48.389±3.953a	0.762±0.060a	0.783±0.019a	17.133±0.536a	14.986±0.842b	4.671±0.074a	4.439±0.127b
C3	50.339±10.697a	48.381±0.397a	0.766±0.033a	0.800±0.006a	16.492±0.844a	18.917±0.882a	4.573±0.119a	4.895±0.114a
C4	48.193±2.649a	41.333±8.377a	0.771±0.052a	0.753±0.017ab	18.943±1.484a	18.820±0.603a	4.890±0.196a	4.897±0.792a

<sup>1)</sup> CK: 对照组(土壤含水量保持在田间最大持水量的75%~80%) The control group (soil moisture content maintained at 75%~80% of the maximum moisture content in field); DS: 干旱胁迫组(土壤含水量保持在田间最大持水量的20%~40%) Drought stress group (soil moisture content maintained at 20%~40% of the maximum moisture content in field). 同列中不同小写字母表示同一指标在不同品种间差异显著( $p<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $p<0.05$ ) difference in the same index among different cultivars. \*: 表示与对照组间差异显著( $p<0.05$ ) Indicating the significant ( $p<0.05$ ) difference with the control group.

<sup>2)</sup> C1: 厚壳甜扁桃品种‘大巴旦’ *Amygdalus communis* var. *typica* ‘Dabadan’; C2: 厚壳甜扁桃品种‘石头巴旦’ *A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’; C3: 软壳甜扁桃品种‘公巴旦’ *A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’; C4: 苦扁桃品种‘苦巴旦’ *A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’.



A: 厚壳甜扁桃品种‘大巴旦’ *Amygdalus communis* var. *typica* ‘Dabadan’; B: 厚壳甜扁桃品种‘石头巴旦’ *A. communis* var. *typica* ‘Shitoubadan’; C: 软壳甜扁桃品种‘公巴旦’ *A. communis* var. *sativa* ‘Gongbadan’; D: 苦扁桃品种‘苦巴旦’ *A. communis* var. *amara* ‘Kubadan’. 1: 对照组(土壤含水量保持在田间最大持水量的75%~80%) The control group (soil water content maintained at 75%~80% of the maximum field capacity); 2: 干旱胁迫组(土壤含水量保持在田间最大持水量的20%~40%) Drought stress group (soil water content maintained at 20%~40% of the maximum field capacity).

图2 干旱胁迫下4个扁桃品种茎木质部的横切面解剖结构

Fig. 2 Anatomical structure of transverse section of stem xylem of four almond cultivars under drought stress

机械强度、纹孔膜面积和纹孔膜直径最低;‘公巴旦’的导管直径、导管平均面积、连接导管壁厚度、导管壁理论机械强度、木材密度和纹孔膜面积最高,导管密度最低;‘苦巴旦’的导管密度和纹孔膜直径最高,导管直径最低。总体来看,干旱胁迫组4个扁桃品种间的多数木质部解剖结构指标差异不显著。

与对照组相比,干旱胁迫组茎木质部解剖结构指标均变化不显著,说明供试干旱胁迫条件对4个扁桃

品种茎木质部自然栓塞度和解剖结构的影响不明显。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 不同扁桃品种叶片解剖结构对干旱胁迫的响应

植物对胁迫环境的响应是一个复杂的过程<sup>[26]</sup>。在干旱胁迫条件下,植物能够通过不同的生长策略来适应环境变化,在叶片结构上主要表现为叶片面积变

小,叶片厚度增加,叶片表皮细胞角质层增厚以及叶肉细胞内栅栏组织增厚、细胞排列紧密、海绵组织变小等,以提高叶片的保水性<sup>[27,28]</sup>。植物体通过改变叶片这些特殊结构的形态和数量来应对胁迫环境,因此,叶片解剖结构特征可作为评价植物耐旱性的重要依据<sup>[29,30]</sup>。研究表明:叶片越厚,说明其储水能力越强、蒸腾速率越低;并且,增厚的表皮细胞和角质层细胞具有保水和隔热作用,可增强植物的耐旱性<sup>[23]</sup>。本研究结果表明:与对照组(土壤含水量保持在田间最大持水量的75%~80%)相比,干旱胁迫组(土壤含水量保持在田间最大持水量的20%~40%)4个扁桃品种的叶片解剖结构的变化不一致。总体来看,‘石头巴旦’的叶片厚度、角质层厚度和表皮细胞厚度均增大,‘大巴旦’和‘公巴旦’则减小,‘苦巴旦’叶片厚度减小,但其角质层厚度和表皮细胞厚度略增大。分析认为,‘大巴旦’和‘公巴旦’叶片变薄及角质层和表皮细胞厚度减小可能是因为干旱胁迫抑制了二者叶片的代谢过程,阻止了细胞的生长和分裂<sup>[27]</sup>。Ayup等<sup>[10]</sup>发现,干旱胁迫能够促进‘苦巴旦’根系生长,扩大根系与土壤的接触面积,有利于根系吸收土壤水分,满足植株的生长和代谢需求。相关研究结果表明:长期生长在干旱环境中的植物可能已经形成适应干旱环境的生存策略<sup>[21,22,27]</sup>。本研究结果表明:4个扁桃品种2年生实生苗的叶片解剖结构特征对干旱胁迫的响应程度不同,然而关于这4个扁桃品种的具体耐旱策略并未明确,有待通过田间多年干旱实验及多个角度进行研究。

### 3.2 不同扁桃品种木质部解剖结构与自然栓塞度的关系

Davis等<sup>[31]</sup>认为,木本植物木质部栓塞特性与其解剖结构特征密切相关,直径大的导管比直径小的导管更容易发生栓塞。植物木质部自然栓塞度指自然状态下木质部导管的栓塞比率,能够反映自然状态下植物木质部的导水损失率<sup>[32]</sup>。相关研究结果表明:植物幼苗茎的木质部自然栓塞度与土壤含水量存在显著负相关<sup>[11,19,33]</sup>。本研究结果显示:干旱胁迫可导致供试的4个扁桃品种茎木质部自然栓塞度显著增大,干旱胁迫下,‘公巴旦’茎木质部自然栓塞度最大,说明此时‘公巴旦’茎木质部的导水损失率最高。茎木质部解剖结构分析结果表明:‘公巴旦’茎木质部的导管直径和导管平均面积在供试的4个扁桃品种中均最大。虽然导管直径增大能促使水分运输效

率提高,但同时也增加了气泡进入导管的风险,从而提高了木质部发生栓塞的几率。

本研究结果表明:在供试的4个扁桃品种中,‘公巴旦’茎木质部对干旱胁迫最敏感,在干旱胁迫环境中容易发生栓塞。然而,从4个扁桃品种的耐旱性评价结果看,‘公巴旦’的耐旱性并非最差,可能是因为‘公巴旦’茎木质部具有抗栓塞结构,即连接导管壁厚度,而且‘公巴旦’在干旱胁迫下的连接导管壁厚度显著高于另3个扁桃品种。研究表明:在干旱胁迫环境下,植物木质部的连接导管壁越厚,导管壁越不易倒塌,在一定程度上防止了栓塞的形成,从而保证木质部的水分运输通畅<sup>[34]</sup>。另外,长期生长在干旱胁迫环境中的耐旱植物的木质部自然栓塞度可能本身就较高<sup>[19,33]</sup>,而且,在干旱环境下适当的木质部栓塞可减少过度蒸腾作用造成的失水,有利于植物保持体内的水分平衡<sup>[35,36]</sup>。刘丽等<sup>[37]</sup>发现,84K杨(*Populus alba* × *P. glandulosa* ‘84K’)的木质部导管直径越大,其抗栓塞能力越弱,自然栓塞度越高,栓塞修复能力越强。由此可见,4个扁桃品种茎木质部的自然栓塞度低并不意味着耐旱性强,有可能是其栓塞修复能力起到一定的作用。然而本研究并没有对4个扁桃品种茎木质部的栓塞修复能力进行研究,后续工作应开展相关研究。

从扁桃2年生实生苗叶片解剖结构和相对含水量对干旱胁迫的响应来看,4个扁桃品种均具备应对干旱胁迫环境的能力,但其耐旱性存在一定差异,其中,‘大巴旦’的耐旱性最强,‘苦巴旦’的耐旱性最弱,‘石头巴旦’和‘公巴旦’的耐旱性中等。干旱胁迫后各扁桃品种茎木质部自然栓塞度明显增加,但各扁桃品种茎木质部的解剖结构并未发生显著变化。

### 参考文献:

- [1] 梁艳霞,王占和,张亚楠,等.扁桃特性及其丰产栽培技术[J].黑龙江粮食,2021,3(10):108-109.
- [2] 侯江涛,张毅芳,沈聪聪,等.扁桃引种栽培技术研究综述[J].林业科技通讯,2020,10(2):11-14.
- [3] NARDINI A, SALLEO S. Water stress-induced modifications of leaf hydraulic architecture in sunflower: co-ordination with gas exchange [J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(422): 3093-3101.
- [4] 冯 瑛. 樱桃砧木抗旱性评价及应对干旱胁迫响应的生理和分子机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学园艺学院,2019.
- [5] 郭改改,封 斌,麻保林,等.不同区域长柄扁桃叶片解剖结构及其抗旱性分析[J].西北植物学报,2013,33(4):720-728.
- [6] 木巴热克·阿尤普,艾沙江·买买提,郭春苗,等.基于叶片显

- 微及亚显微结构的新疆扁桃 10 个主栽品种抗旱性综合评价[J]. 果树学报, 2019, 36(3): 347-358.
- [7] 董晓民, 张安宁, 刘伟, 等. 扁桃及普通桃品种的叶片解剖结构及耐旱性分析[J]. 山东农业科学, 2017, 49(11): 45-47.
- [8] 克热木·伊力, 王丽娜, 侯江涛. 水分胁迫对扁桃砧木干物质和叶绿素含量的影响[J]. 经济林研究, 2007, 25(4): 1-5.
- [9] 王丽娜, 克热木·伊力, 侯江涛. 水分胁迫对扁桃砧木叶片脯氨酸、可溶性蛋白质、质膜透性、相对含水量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2006, 29(3): 53-58.
- [10] AYUP M, YANG B, GONG P, et al. Evaluation of drought resistance of native almond-rootstock varieties in Xinjiang, China [J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2022, 50(1): 48-68.
- [11] 木巴热克·阿尤普, 伊丽米努尔, 荆卫民. 不同水分处理下几种柽柳属植物幼株木质部栓塞及其解剖结构特征[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(10): 42-52.
- [12] 陆世通, 陈森, 李彦, 等. 罗汉松科 3 种植物茎和根木质部水分运输、解剖结构与机械强度之间的关系[J]. 植物生态学报, 2021, 45(6): 659-669.
- [13] 方菁, 叶琳峰, 陈森, 等. 自然和人工生境被子植物枝木质部结构与功能差异[J]. 植物生态学报, 2021, 45(6): 650-658.
- [14] 黄恺翔, 俞重阳, 钱海蓉, 等. 鸡公山国家级自然保护区散孔材、环孔材树种木质部结构和功能的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(2): 244-251.
- [15] KAACK L, WEBER M, ISASA E, et al. Pore constrictions in intervessel pit membranes provide a mechanistic explanation for xylem embolism resistance in angiosperms [J]. *New Phytologist*, 2021, 230(5): 1829-1843.
- [16] 卡德尔·阿不都热西提. 干旱胁迫下不同作物品种叶片含水量的测定[J]. 喀什师范学院学报, 2009, 30(6): 50-53.
- [17] 李越, 盛雅媛, 苏云, 等. 马铃薯与枸杞植物组织石蜡切片双重染色技术的改进[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2019, 35(3): 29-33.
- [18] 徐青. 植物石蜡切片双重染色技术的改进[J]. 宁夏农学院学报, 1999, 20(2): 89-90.
- [19] 木巴热克·阿尤普, 荆卫民, 伊丽米努尔, 等. 柽柳属 6 种植物侧枝木质部导水率与纹孔数量特征关系[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 106-111.
- [20] NARDINI A, GASCÒ A, TRIFILÒ P, et al. Ion-mediated enhancement of xylem hydraulic conductivity is not always suppressed by the presence of  $Ca^{2+}$  in the sap [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(10): 2609-2615.
- [21] 木巴热克·阿尤普, 杨波, 艾沙江·买买提, 等. 基于当年生枝木质部解剖结构的扁桃品种栓塞抗性分析[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 99-105.
- [22] JANSEN S, CHOAT B, PLETTERS A. Morphological variation of intervessel pit membranes and implications to xylem function in angiosperms [J]. *American Journal of Botany*, 2009, 96(2): 409-419.
- [23] 任哲, 贡翔, 张锐, 等. 扁桃优株叶片解剖结构与其抗旱性关系研究[J]. 农业与技术, 2022, 42(3): 10-14.
- [24] 刘彬, 麻文俊, 王军辉, 等. 基于叶片解剖结构的砂生槐群体抗旱性评价[J]. 植物研究, 2017, 37(3): 325-333.
- [25] 郭改改. 不同区域长柄扁桃的抗旱性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学园艺学院, 2014: 1-59.
- [26] 李红喜, 陈新会, 康战芳, 等. 天竺桂叶片抗寒性生理生化指标测定及综合评价[J]. 河南林业科技, 2014, 34(4): 26-29.
- [27] 王延秀, 贾旭梅, 石晓响, 等. 三种苹果砧木应对干旱胁迫的超微及解剖结构响应特性[J]. 植物生理学报, 2018, 54(4): 594-606.
- [28] 董建芳, 李春红, 刘果厚, 等. 内蒙古 6 种沙生柳树叶片解剖结构的抗旱性分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 480-484.
- [29] 王树森, 孟凡旭, 赵波, 等. 大青山阳坡五种灌木叶片解剖结构及其抗旱性研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(1): 38-44.
- [30] 李全发, 王宝娟, 安丽华, 等. 青藏高原草地植物叶解剖特征[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2062-2070.
- [31] DAVIS S D, SPERRY J S, HACKE U G. The relationship between xylem conduit diameter and cavitation caused by freezing [J]. *American Journal of Botany*, 1999, 86(10): 1367-1372.
- [32] 陈龙龙. 土壤增温和隔离降雨对杉木叶片渗透调节和枝木质部功能的影响[D]. 福州: 福建师范大学生命科学学院, 2019: 1-67.
- [33] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 木本植物水力系统对干旱胁迫的响应机制[J]. 植物生态学报, 2021, 45(9): 1-17.
- [34] 孟凤. 七种槭树科植物木质部栓塞及其恢复与植物抗旱性的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学理学院, 2019: 1-87.
- [35] HACKE U G, SPERRY J S, WHEELER J K, et al. Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency [J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(6): 689-701.
- [36] SPERRY J S, HACKE U G, PITTMANN J. Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels [J]. *American Journal of Botany*, 2006, 93(10): 1490-1500.
- [37] 刘丽, 张立, 蔡靖, 等. 干旱胁迫及复水后 84K 杨栓塞修复及其他水力学特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(7): 22-30.

(责任编辑: 佟金凤)