

网络出版时间:2018-04-20 16:29

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2018.09.007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180420.1628.014.html>

板栗叶片解剖结构特征及其与抗旱性的关系

郭素娟,武燕奇

(北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083)

【摘 要】 【目的】比较河北省迁西地区 10 个板栗品种(系)叶片解剖结构及气孔特征,了解其水分适应机制,比较其抗旱性,为迁西地区筛选抗旱板栗品种(系)提供理论依据。【方法】以大板红(DBH)、燕龙(YL)、紫晶(ZJ)、迁西早红(QXZH)、燕山短枝(YSDZ)、燕山早丰(YSZF)、紫珀(ZP)、燕奎(YK)、迁西晚红(QXWH)、迁西壮栗(QXZL)等 10 个板栗品种(系)为研究对象,通过石蜡切片法及指甲油印迹法,比较叶片厚度、上(下)表皮角质层厚度、上(下)表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比、叶片栅栏组织结构紧密度、叶片海绵组织结构疏松度、气孔大小、气孔密度、气孔开口大小等 15 项指标,运用主成分分析及隶属函数法对 10 个供试品种(系)的抗旱性进行评价。【结果】10 个板栗品种 15 项指标反映板栗抗旱性能力的顺序为:叶片海绵组织结构疏松度>栅栏组织厚度>栅海比>叶片栅栏组织结构紧密度>海绵组织厚度>叶片厚度>上表皮厚度>下表皮厚度>气孔开张宽度>气孔密度>气孔开张长度>气孔长度=下表皮角质层厚度>气孔宽度>上表皮角质层厚度。运用隶属函数法,结合各指标所占权重对各品种(系)的抗旱性进行评价,得到 10 个板栗品种(系)抗旱性的顺序为:大板红>紫晶>燕龙>燕奎>燕山短枝>燕山早丰>紫珀>迁西晚红>迁西早红>迁西壮栗。经聚类分析,将 10 个板栗品种(系)分为 3 类:抗旱性强的有紫晶、大板红、燕龙、燕奎,抗旱性中等的有紫珀、燕山短枝、燕山早丰、迁西晚红,抗旱性弱的有迁西早红、迁西壮栗。【结论】叶片解剖结构指标能够较好地反映板栗的抗旱特性,可用于其抗旱性鉴定。10 个板栗品种(系)中,紫晶、大板红、燕龙、燕奎抗旱性最强,可在迁西地区广泛种植。

【关键词】板栗;叶片解剖结构;气孔特征;抗旱性;主成分分析;隶属函数法

【中图分类号】S718.43

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2018)09-0051-09

Leaf anatomical structure characteristics and drought resistance of Chinese chestnut

GUO Sujuan, WU Yanqi

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】The leaf anatomical structure, stomatal characteristics, the response mechanism of water adaptability, and the drought resistance of ten Chinese chestnut varieties were compared and analyzed to provide theoretical basis for screening drought resistant chestnut varieties (strain) in Qianxi, Hebei. 【Method】Ten Chinese chestnut varieties (clones) including ‘Dabanhong’ (DBH), ‘Yanlong’ (YL), ‘Zijing’ (ZJ), ‘Qianxizaohong’ (QXZH), ‘Yanshanduanzhi’ (YSDZ), ‘Yanshanzaofeng’ (YSZF), ‘Zipo’ (ZP), ‘Yankui’ (YK), ‘Qianxiwanhong’ (QXWH), ‘Qianxizhuangli’ (QXZL) were selected and paraffin sectioning and nail oil seal methods were used to compare 15 indices such as thickness of leaves, cuticle thickness of upper (lower) epidermis, thickness of upper (lower) epidermis, thicknesses of palisade tissue and spongy tissue, ratio of palisade tissue to spongy tissue, leaves compactness and porosity, stomatal size

【收稿日期】2017-06-02

【基金项目】国家林业公益性行业科研专项重大项目(201204401);“十二五”科技支撑专题项目(2013BAD14B0402)

【作者简介】郭素娟(1965—),女,内蒙古呼和浩特人,教授,博士,博士生导师,主要从事经济林(果树)栽培与利用研究。

E-mail: gwangzs@263.net

and density and stomatal aperture. The principal component analysis and subordinate function were used to evaluate the drought resistance of the ten varieties. 【Result】 The drought resistant abilities of the 15 indices of ten Chinese chestnut varieties were in the decreasing order of leaves porosity>thickness of palisade tissue>ratio of palisade tissue to spongy tissue>leaves compactness>thickness of spongy tissue>thickness of leaves>thickness of upper epidermis>thickness of lower epidermis>stomatal aperture width>stomatal density>stomatal aperture length>stomatal length=cuticle thickness of lower epidermis>stomatal width>cuticle thickness of upper epidermis. Based on the subordinate function in combination with weights of indexes, the drought resistance of the ten varieties (clones) of Chinese chestnut was in the order of DBH>ZJ>YL>YK>YSDZ>YSZF>ZP>QXWH>QXZH>QXZL. By clustering analysis, the ten varieties (clones) of Chinese chestnut were divided into three categories. The higher drought resistance group included DBH, ZJ, YL and YK, the moderate drought resistance group included YSDZ, YSZF, ZP and QXWH, and the lower drought resistance group included QXZH and QXZL. 【Conclusion】 Comprehensive utilization of the leaf anatomical structure indices can better reflect drought resistance characteristics, and can be used to identify drought resistance of Chinese chestnut. Among the ten studied varieties (lines), ZJ, DBH, YL and YK had the strongest drought resistance and can be widely cultivated in Qianxi, Hebei.

Key words: Chinese chestnut; leaf anatomical structure; stomatal characteristic; drought resistance; principle component analysis; subordinate function

干旱是限制植物正常生长发育的主要因子之一^[1]。随全球气候变化,干旱越来越成为制约世界各国农林业发展的重要因素^[2]。叶片控制植物光合作用、水分蒸腾、气体交换等生理活动,对植物的正常生长发育至关重要,因其长期暴露于自然环境中,因此对环境产生了一定的适应性^[3-4]。干旱条件下,植物叶片的形态及解剖结构均会发生一系列变化,这些变化有利于提高其对水分的利用效率,从而适应干旱环境。

近年来,许多学者运用多元统计分析方法对叶片形态及解剖结构与抗旱性的关系进行了研究^[5]。如潘昕等^[6]利用石蜡切片法对青藏高原 25 种灌木的抗旱性进行了评价。翟晓巧等^[7]利用扫描电镜法对 8 种落叶乔木的抗旱性进行了研究。张义等^[8]利用石蜡切片法及指甲油印迹法对西宁市 11 种城市森林植物的抗旱性进行了评价。植物叶片包括上(下)表皮、栅栏组织、海绵组织、气孔等结构。相关研究表明,气孔密度、叶片厚度、栅栏组织厚度、紧密度等与抗旱性呈正相关关系;气孔大小、气孔开张度、海绵组织厚度、疏松度等与抗旱性呈负相关关系^[9-12]。

板栗(*Castanea mollissima* Bl.)是重要经济林树种之一,其坚果食用部分富含碳水化合物,并有蛋白质、脂肪、矿物质等多种营养成分,是我国重要的木本粮食物种,被誉为“铁杆庄稼”,具有分布范围广、适应能力强、果实品质优良、综合利用价值高等

特性,在国际市场上占有重要地位。目前有关板栗抗旱性的研究多集中于生理指标方面,如李钧^[13]研究了水分胁迫后板栗苗木丙二醛、脯氨酸、保护酶活性的变化;时忠杰等^[14]、郑龙等^[15]、武燕奇等^[16]以板栗苗木为对象,研究了 MDA 含量、SOD 和 POD 活性、电导率等生理指标及根系形态指标对干旱胁迫的响应情况。而关于板栗叶片解剖结构特征及其与抗旱性关系的研究报道较少。为此,本研究以河北省迁西县 10 个板栗品种(系)为试验材料,分析其叶片解剖结构及气孔特征,综合评价其抗旱性,以期迁西地区抗旱板栗品种(系)的筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北省迁西县北京林业大学经济林(板栗)育种与栽培实践基地,地处 118°06′—118°37′E,39°57′—40°27′N,属暖温带大陆性半湿润季风气候。试验地年平均降水量 804.2 mm,年最大降水量 1 066.4 mm,年最小降水量 428.4 mm;年平均气温 10.1℃,7 月份平均气温 25℃,1 月份平均气温 -7.8℃;无霜期一般为 183 d。

1.2 试验材料

在试验地选取长势良好、一致的大板红(DBH)、燕龙(YL)、紫晶(ZJ)、迁西早红(QXZH)、燕山短枝(YSDZ)、燕山早丰(YSZF)、紫珀(ZP)、燕

奎(YK)、迁西晚红(QXWH)和迁西壮栗(QXZL)等10个板栗品种(系)的7年生植株用于试验。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 叶片解剖结构 于2015年8月,对10个供试板栗品种(系)进行取样。每品种(系)选取10株,取树冠中上部向阳处的功能叶30片进行试验。选择晴天上午09:00—11:00进行取样,以便于气孔结构的观察。于叶片主脉两侧剪取0.5 cm×0.5 cm的小方块,立即用FAA固定液固定,采用常规石蜡切片法^[17]制作石蜡切片,每品种(系)20个重复。切片在Olympus DP72显微镜下进行观察,并用Motic Image Advanced 3.0软件对叶片厚度(X_1)、上表皮角质层厚度(X_2)、上表皮厚度(X_3)、下表皮厚度(X_4)、下表皮角质层厚度(X_5)、栅栏组织厚度(X_6)、海绵组织厚度(X_7)等指标进行测量,每个视野重复30次,并按照下列公式计算相关指标:

栅海比(X_8)=栅栏组织厚度/海绵组织厚度。

叶片栅栏组织结构紧密度(X_9)=栅栏组织厚度/叶片厚度×100%。

叶片海绵组织结构疏松度(X_{10})=海绵组织厚度/叶片厚度×100%。

1.3.2 气孔特征 采样及固定方法同1.3.1。采用指甲油印迹法^[8],先用橡皮将板栗叶片背面的星状毛擦掉,涂一层透明指甲油,待其完全晾干后,用透明胶带粘下一块下表皮,置于载玻片上,每品种(系)20个重复,在Olympus DP72显微镜下进行观察,并用Motic Image Advanced 3.0软件对气孔长度(X_{11})、气孔宽度(X_{12})、气孔开张宽度(X_{13})、气孔开张长度(X_{14})、气孔密度(X_{15})等指标进行测量,每个视野重复30次。

1.3.3 数据处理 采用Excel和SPSS进行数据处理。利用主成分法、隶属函数法、聚类分析法对各品种(系)抗旱性进行研究。

采用主成分分析法确定各指标的权重,加权求和得出板栗不同品种(系)抗旱性度量值(D)^[16,18],再根据10个品种(系)板栗的 D 值进行聚类分析。 D 计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^m (R(X_{ij}) \times W_j)。$$

式中: $R(X_{ij})$ 表示*i*品种(系)*j*指标的隶属函数值, W_j 为指标*j*的权重。 $R(X_{ij})$ 的计算公式^[12]为:

$$R(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})。$$

如某一指标与抗旱性为负相关,则:

$$R(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})。$$

式中: X_{ij} 表示*i*品种(系)*j*指标的测定值, $X_{\max}$ 及 $X_{\min}$ 分别表示*j*指标的最大值及最小值。

2 结果与分析

2.1 不同品种(系)板栗叶片解剖结构特征的比较

植物叶片由于长期暴露在自然环境中,因此形态结构特征可以反映其对环境的适应性^[5]。小而厚的叶片可以提高保水力,减少蒸腾面积。叶片上、下表皮可以起到减少水分蒸发的作用,上、下表皮越厚,则抗旱性越强。由表1可知,10个板栗品种(系)中,燕奎的叶片最厚(210.65 μm),燕龙最薄(129.92 μm);紫珀、大板红、燕奎、迁西早红、迁西晚红之间及紫晶、燕山早丰、燕山短枝之间叶片厚度差异不显著($P > 0.05$),但均显著大于迁西壮栗($P < 0.05$),迁西壮栗显著大于燕龙($P < 0.05$)。燕龙的上表皮角质层最厚(12.61 μm),迁西早红最薄(4.70 μm);紫晶、大板红、燕龙之间及燕奎、燕山早丰、燕山短枝、迁西早红、迁西晚红、迁西壮栗之间上表皮角质层厚度差异不显著($P > 0.05$),且以前面几个品种较厚。大板红的上表皮最厚(31.36 μm),燕山早丰最薄(18.48 μm),二者差异显著($P < 0.05$),其他品种间均无显著差异。燕山早丰下表皮最厚(13.08 μm),大板红最薄(6.89 μm),其他品种(系)间基本无显著差异。燕山早丰的下表皮角质层最厚(4.61 μm),紫珀最薄(1.60 μm),其他品种(系)间基本无显著差异。

叶片栅栏组织中细胞排列紧密,可以减少水分蒸发,提高光合效率,进而增加植物的抗旱能力。海绵组织中细胞排列疏松,不利于水分的保持,影响植株的抗旱能力。叶片栅栏组织结构紧密度和海绵组织结构疏松度分别反映栅栏组织、海绵组织占叶片厚度的比例,可以表征抗旱性。由表1可知,在10个板栗品种(系)中,燕奎的栅栏组织厚度最厚(103.78 μm),迁西壮栗最薄(40.67 μm);紫晶、紫珀、大板红、燕龙、燕奎、燕山短枝、迁西早红之间及迁西晚红、迁西壮栗之间栅栏组织厚度差异不显著($P > 0.05$),且前者显著大于后者($P < 0.05$)。迁西晚红的海绵组织最厚(117.24 μm),紫晶最薄(51.52 μm);紫珀、燕奎、燕山早丰、迁西早红、迁西壮栗的海绵组织厚度显著大于紫晶($P < 0.05$),但显著小于迁西晚红($P < 0.05$)。紫晶的栅海比最大(1.84),显著大于其他品种($P < 0.05$),迁西壮栗的最小(0.42);大板红、燕龙、燕奎、燕山短枝之间及迁西晚红、迁西壮栗之间栅海比差异不显著($P >$

0.05)。燕龙叶片的栅栏组织结构紧密度最大(0.62),显著高于其他品种(系),迁西晚红最小(0.25);紫晶、大板红、燕奎、燕山短枝之间及迁西晚红、迁西壮栗之间栅栏组织结构紧密度差异不显著($P>0.05$)。迁西晚红叶片的海绵组织结构疏松度

最大(0.60),紫晶最小(0.30);紫晶、大板红、燕山短枝之间差异不显著($P>0.05$),但显著低于其他品种($P<0.05$);迁西晚红、迁西壮栗之间差异不显著($P>0.05$),但显著高于其他品种($P<0.05$)。

表 1 10 个品种(系)板栗叶片的解剖结构特征

Table 1 Leaf anatomical structure characteristics of ten varieties (clones) of Chinese chestnut

品种(系) Variety(clone)	$X_1/\mu\text{m}$	$X_2/\mu\text{m}$	$X_3/\mu\text{m}$	$X_4/\mu\text{m}$	$X_5/\mu\text{m}$
紫晶 ZJ	173.99±1.51 b	10.23±2.18 ab	28.16±1.16 ab	11.54±1.23 ab	2.23±0.99 bcd
紫珀 ZP	196.01±2.23 a	9.13±1.32 bc	23.42±2.71 abc	8.56±2.38 ab	1.60±0.07 d
大板红 DBH	198.34±2.19 a	9.85±1.73 ab	31.36±4.27 a	6.89±1.12 b	2.65±0.19 bcd
燕龙 YL	129.92±4.88 d	12.61±2.11 a	23.73±3.81 abc	8.11±2.12 ab	3.21±0.28 abcd
燕奎 YK	210.65±3.56 a	7.20±1.09 bcd	20.97±2.64 bc	10.70±2.72 ab	1.68±0.95 d
燕山早丰 YSZF	180.32±9.85 b	7.04±0.98 bcd	18.48±2.92 c	13.08±2.71 a	4.61±1.12 a
燕山短枝 YSDZ	183.06±5.43 b	7.66±0.78 bcd	25.80±3.42 abc	10.84±2.20 ab	3.59±0.46 ab
迁西早红 QXZH	199.93±6.04 a	4.70±1.12 d	24.77±4.17 abc	10.96±2.17 ab	3.19±1.02 abcd
迁西晚红 QXWH	197.02±1.62 a	6.69±1.18 bcd	21.95±3.26 bc	12.78±1.15 a	3.46±0.24 abc
迁西壮栗 QXZL	154.22±12.64 c	6.11±1.19 cd	22.64±2.28 bc	13.05±2.19 a	1.83±0.12 cd

品种(系) Variety(clone)	$X_6/\mu\text{m}$	$X_7/\mu\text{m}$	X_8	$X_9/\%$	$X_{10}/\%$
紫晶 ZJ	94.77±8.97 ab	51.52±5.72 d	1.84±0.03 a	0.54±0.02 b	0.30±0.02 f
紫珀 ZP	86.05±11.28 ab	80.86±9.92 bc	1.06±0.01 de	0.44±0.04 cd	0.41±0.03 bcd
大板红 DBH	99.36±10.21 a	66.38±9.11 bcd	1.50±0.06 b	0.50±0.00 bc	0.33±0.02 ef
燕龙 YL	80.29±6.98 ab	60.06±7.29 cd	1.34±0.05 bc	0.62±0.00 a	0.46±0.02 b
燕奎 YK	103.78±19.95 a	73.72±7.82 bc	1.41±0.29 bc	0.49±0.07 bc	0.35±0.06 def
燕山早丰 YSZF	72.19±5.07 b	77.66±3.48 bc	0.93±0.05 e	0.40±0.02 d	0.43±0.04 bc
燕山短枝 YSDZ	88.58±2.50 ab	63.32±4.76 cd	1.41±0.13 bc	0.49±0.04 bc	0.35±0.04 ef
迁西早红 QXZH	92.61±10.56 ab	78.76±10.22 bc	1.18±0.02 cd	0.46±0.02 cd	0.39±0.02 cde
迁西晚红 QXWH	49.15±3.17 c	117.24±11.18 a	0.42±0.01 f	0.25±0.01 e	0.60±0.01 a
迁西壮栗 QXZL	40.67±7.15 c	85.42±11.18 b	0.47±0.03 f	0.26±0.02 e	0.55±0.02 a

注: X_1 . 叶片厚度; X_2 . 上表皮角质层厚度; X_3 . 上表皮厚度; X_4 . 下表皮厚度; X_5 . 下表皮角质层厚度; X_6 . 栅栏组织厚度; X_7 . 海绵组织厚度; X_8 . 栅海比; X_9 . 叶片栅栏组织结构紧密度; X_{10} . 叶片海绵组织结构疏松度。同列数据后标不同小写字母表示在 $P=0.05$ 水平存在显著性差异(Duncan’s 法)。下表同。

Note: X_1 . Thickness of leaves; X_2 . Cuticle thickness of upper epidermis; X_3 . Thickness of upper epidermis; X_4 . Thickness of lower epidermis; X_5 . Cuticle thickness of lower epidermis; X_6 . Thickness of palisade tissue; X_7 . Thickness of spongy tissue; X_8 . Ratio of palisade tissue to spongy tissue; X_9 . Leaves compactness; X_{10} . Leaves compactness and porosity. Different lowercase letters in each column mean significant difference at $P=0.05$ level (Duncan’s). The same below.

2.2 不同板栗品种(系)叶片气孔特征的比较

叶片上气孔的大小、密度及开张程度影响水分的蒸腾速率,气孔小而密且开张程度较小可以减少水分蒸腾耗散,提高其抗旱性。由表 2 可知,10 个板栗品种(系)中,迁西早红叶片气孔长度最大(24.28 μm),燕龙最小(18.17 μm),二者差异显著($P<0.05$)。大板红的叶片气孔宽度最大(20.90 μm),燕龙最小(16.59 μm),显著小于除紫晶、燕奎外的其他品种($P<0.05$)。紫晶的叶片气孔开张宽度最大(7.74 μm),迁西晚红最小(2.39 μm);紫晶、迁西早红之间差异不显著($P>0.05$),但显著高于其他品种($P<0.05$)。10 个板栗品种(系)的叶片气孔开张长度差异不显著($P>0.05$),以燕山早丰最

大(13.00 μm),迁西晚红最小(10.17 μm)。燕山早丰的叶片气孔密度最大(1 000.73 mm^{-2}),迁西壮栗最小(648.48 mm^{-2});紫晶、大板红、燕奎、燕山短枝、迁西早红、迁西晚红之间差异不显著($P>0.05$),紫珀、迁西壮栗之间差异不显著($P>0.05$)。

2.3 板栗抗旱指标权重的确定

10 个板栗品种(系)所测 15 项指标之间存在一定的相关关系,反映的信息有一定重叠,不能直接用来分析抗旱性。因此,本试验通过主成分分析确定 15 项指标反映抗旱性时所占的权重,结果见表 3。由表 3 可知,第 1 主成分贡献率为 40.41%,其中上表皮角质层厚度、上表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比、叶片栅栏组织结构紧密度、叶片

海绵组织结构疏松度、下表皮厚度等在第 1 主成分上载荷较高,表明上表皮角质层、上表皮、栅栏组织越厚,栅海比、叶片栅栏组织结构紧密度越大,叶片海绵组织结构疏松度越小,板栗抗旱性越强。第 2 主成分贡献率为 17.58%,其中叶片厚度、气孔密度在第 2 主成分上载荷较高,表明叶片越厚,气孔密度越大,抗旱能力越强。第 3 主成分贡献率为 16.13%,其中气孔长度、气孔开张长度在第 3 主成

分上载荷较高。第 4 主成分贡献率为 11.06%,下表皮角质层厚度、气孔宽度、气孔开张宽度在第 4 主成分上载荷较高。气孔是植物吸收 CO₂、散失水分的通道,气孔大小、气孔开张度与抗旱性存在一定关系。第 5 主成分贡献率为 8.06%,叶片厚度在第 5 主成分上载荷较高。5 个主成分贡献率累计达到 93.25%,与抗旱能力相关性大,因此提取前 5 个主成分分析板栗的抗旱性。

表 2 10 个品种(系)板栗叶片的气孔特征

Table 2 Leaf stomatal structure characteristics of varieties(clones)of ten Chinese chestnut					
品种(系) Variety(clone)	$X_{11}/\mu\text{m}$	$X_{12}/\mu\text{m}$	$X_{13}/\mu\text{m}$	$X_{14}/\mu\text{m}$	X_{15}/mm^{-2}
紫晶 ZJ	21.55±2.18 ab	18.50±1.61 bc	7.74±0.77 a	11.53±0.56 a	756.50±33.81 cd
紫珀 ZP	22.66±0.68 ab	19.31±1.48 ab	2.96±0.58 de	11.33±2.31a	676.05±42.77 de
大板红 DBH	20.62±1.34 bc	20.90±2.40 ab	2.84±0.62 de	10.31±1.22 a	817.39±20.05 c
燕龙 YL	18.17±2.19 c	16.59±3.07 c	6.14±0.74 b	11.92±0.50 a	932.13±29.53 b
燕奎 YK	20.11±1.22 bc	17.23±1.42 bc	6.38±0.77 b	11.05±1.63 a	739.51±20.52 cd
燕山早丰 YSZF	22.92±1.80 ab	20.53±1.47 ab	3.37±0.21 de	13.00±1.33 a	1 000.73±17.04 a
燕山短枝 YSDZ	22.84±2.48 ab	20.51±1.44 ab	3.86±0.55 d	11.42±1.43 a	762.42±34.95 cd
迁西早红 QXZH	24.28±1.60 a	20.39±1.71 ab	7.53±0.16 a	12.84±1.52 a	744.70±75.26 cd
迁西晚红 QXWH	20.33±2.69 bc	19.27±1.97 ab	2.39±0.55 e	10.17±0.54 a	764.94±25.81 cd
迁西壮栗 QXZL	23.97±1.29 a	20.87±1.22 ab	4.87±0.94 c	11.99±0.42 a	648.48±30.23 e

注: X_{11} . 气孔长度; X_{12} . 气孔宽度; X_{13} . 气孔开张宽度; X_{14} . 气孔开张长度; X_{15} . 气孔密度。
Note: X_{11} . Stomatal length; X_{12} . Stomatal width; X_{13} . Stomatal aperture width; X_{14} . Stomatal aperture length; X_{15} . Stomatal density.

表 3 10 个板栗品种(系)15 项指标的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of 15 indexes of ten varieties (clones) of Chinese chestnut					
指标 Indexes	主成分 Principle components				
	1	2	3	4	5
X_1	-0.10	0.71	-0.13	0.30	0.60
X_2	0.72	-0.48	-0.36	0.02	-0.27
X_3	0.58	0.42	-0.24	0.21	-0.49
X_4	-0.72	-0.05	0.41	-0.22	0.16
X_5	-0.20	-0.48	0.44	0.66	0.10
X_6	0.84	0.35	0.13	0.15	0.34
X_7	-0.87	0.00	-0.36	0.05	0.26
X_8	0.95	0.18	0.17	0.05	0.06
X_9	0.96	-0.16	0.16	0.02	0.05
X_{10}	-0.81	-0.43	-0.29	-0.16	-0.11
X_{11}	-0.47	0.57	0.59	0.00	-0.26
X_{12}	-0.48	0.50	0.27	0.51	-0.43
X_{13}	0.45	0.04	0.48	-0.66	0.10
X_{14}	-0.09	-0.20	0.91	-0.15	-0.09
X_{15}	0.22	-0.72	0.31	0.52	0.16
特征值 Eigen value	6.06	2.64	2.42	1.66	1.21
贡献率/% Contribution rate	40.41	17.58	16.13	11.06	8.06
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	40.41	58.00	74.12	85.19	93.25

注: $X_1\sim X_{15}$ 所代表的指标与表 1 和表 2 相同。表 4 同。
Note:The indexes of X_1-X_{15} are the same as Table 1, Table 2, and Table 4.

根据主成分载荷矩阵求得主成分 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 的表达式分别为:

$F_1 = -0.04X_1 + 0.29X_2 + 0.24X_3 - 0.29X_4 - 0.08X_5 + 0.34X_6 - 0.35X_7 + 0.39X_8 +$

$0.39X_9 - 0.33X_{10} - 0.19X_{11} - 0.19X_{12} + 0.18X_{13} - 0.04X_{14} + 0.09X_{15}。$

$F_2 = 0.44X_1 - 0.29X_2 + 0.26X_3 - 0.03X_4 - 0.29X_5 + 0.21X_6 + 0.11X_8 - 0.10X_9 -$

$$\begin{aligned} &0.26X_{10}+0.35X_{11}+0.31X_{12}+0.02X_{13}- \\ &0.13X_{14}-0.44X_{15}。 \\ F_3= &-0.08X_1-0.23X_2-0.16X_3+0.27X_4+ \\ &0.28X_5+0.08X_6-0.23X_7+0.11X_8+ \\ &0.10X_9-0.18X_{10}+0.38X_{11}+0.17X_{12}+ \\ &0.31X_{13}+0.59X_{14}+0.20X_{15}。 \\ F_4= &0.24X_1+0.02X_2+0.16X_3-0.17X_4+0.51X_5+ \\ &0.12X_6+0.04X_7+0.04X_8+0.02X_9- \\ &0.12X_{10}+0.40X_{12}-0.51X_{13}-0.12X_{14}+ \\ &0.41X_{15}。 \\ F_5= &0.55X_1-0.24X_2-0.44X_3+0.15X_4+0.09X_5+ \\ &0.31X_6+0.24X_7+0.06X_8+0.04X_9- \\ &0.10X_{10}-0.24X_{11}-0.39X_{12}+0.09X_{13}- \\ &0.08X_{14}+0.15X_{15}。 \end{aligned}$$

根据 5 个主成分的权重,求得主成分 F 的表达式为:

$$F=(\lambda_1 F_1+\lambda_2 F_2+\lambda_3 F_3+\lambda_4 F_4+\lambda_5 F_5)/(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5)。$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 分别为 5 个主成分的特征根。

即:

$$\begin{aligned} F= &0.13X_1+0.01X_2+0.11X_3-0.09X_4+ \\ &0.03X_5+0.24X_6-0.17X_7+0.22X_8+ \\ &0.17X_9-0.25X_{10}+0.03X_{11}+0.02X_{12}+ \end{aligned}$$

$$0.08X_{13}+0.04X_{14}+0.05X_{15}。$$

上述表达式中,指标前数值越大,表示权重越大,越能反映板栗抗旱性。由此可知,15 项指标反映板栗抗旱性能力的顺序为:叶片海绵组织结构疏松度(0.25)>栅栏组织厚度(0.24)>栅海比(0.22)>叶片栅栏组织结构紧密度(0.17)>海绵组织厚度(0.17)>叶片厚度(0.13)>上表皮厚度(0.11)>下表皮厚度(0.09)>气孔开张宽度(0.08)>气孔密度(0.05)>气孔开张长度(0.04)>气孔长度(0.03)=下表皮角质层厚度(0.03)>气孔宽度(0.02)>上表皮角质层厚度(0.01)。

2.4 10 个板栗品种(系)抗旱性的隶属函数分析及综合评价

根据隶属函数法,求得 10 个板栗品种(系)不同指标的隶属函数值,结合主成分分析法求出的各指标权重,综合计算抗旱性度量值(表 4),据此对抗旱性进行排序。由表 4 可知,抗旱性度量值最大的品种为大板红(1.27),最小的为迁西壮栗(0.36)。10 个板栗品种(系)的抗旱性排序为:大板红(1.27)>紫晶(1.24)>燕龙(1.13)>燕奎(1.13)>燕山短枝(0.94)>燕山早丰(0.94)>紫珀(0.90)>迁西晚红(0.84)>迁西早红(0.44)>迁西壮栗(0.36)。

表 4 10 个品种(系)板栗抗旱性的隶属函数值和抗旱性度量值(D)

Table 4 Subjection function values, index weights and drought resistance values(D) of ten varieties(clones)of Chinese chestnut

品种(系) Variety(clone)	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
紫晶 ZJ	0.85	0.65	1.00	0.00	0.35	0.93	0.77	0.76	0.68
紫珀 ZP	0.82	0.56	0.38	0.27	0.00	0.72	0.55	0.45	0.51
大板红 DBH	0.55	0.70	0.75	0.75	0.21	0.86	1.00	1.00	0.80
燕龙 YL	1.00	0.32	0.19	0.62	0.02	1.00	0.66	0.70	0.66
燕奎 YK	0.66	0.37	0.57	0.64	0.66	0.76	0.82	0.69	0.65
燕山早丰 YSZF	0.87	0.00	0.49	0.66	0.53	0.82	0.59	0.53	0.58
燕山短枝 YSDZ	0.00	1.00	0.41	0.20	0.53	0.63	0.87	0.65	1.00
迁西早红 QXZH	0.83	0.25	0.27	0.95	0.62	0.13	0.00	0.00	0.00
迁西晚红 QXWH	0.62	0.30	0.00	1.00	1.00	0.50	0.60	0.36	0.41
迁西壮栗 QXZL	0.30	0.18	0.32	0.99	0.08	0.00	0.48	0.04	0.04

品种(系) Variety (clone)	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	D	排名 Order
紫晶 ZJ	0.87	0.60	0.00	0.92	0.95	0.48	1.24	2
紫珀 ZP	0.61	0.27	0.37	0.89	0.59	0.08	0.90	7
大板红 DBH	1.00	0.45	0.56	0.00	0.52	0.31	1.27	1
燕龙 YL	0.82	0.68	0.85	0.25	0.69	0.26	1.13	3
燕奎 YK	0.83	0.24	0.09	0.73	0.56	0.32	1.13	4
燕山早丰 YSZF	0.67	0.00	0.12	0.04	0.06	0.27	0.94	6
燕山短枝 YSDZ	0.44	1.00	1.00	0.30	0.38	0.81	0.94	5
迁西早红 QXZH	0.00	0.65	0.38	1.00	1.00	0.33	0.44	9
迁西晚红 QXWH	0.55	0.22	0.09	0.82	0.00	1.00	0.84	8
迁西壮栗 QXZL	0.14	0.05	0.01	0.54	0.36	0.00	0.36	10

2.5 10 个板栗品种(系)抗旱性的聚类分析

依据板栗的抗旱性度量值,对 10 个品种(系)进行聚类分析,结果如图 1 所示。由图 1 可知,10 个板栗品种(系)按抗旱性强弱可以分为 3 类,其中第

1 类抗旱性强,品种(系)有紫晶、大板红、燕龙、燕奎;第 2 类抗旱性中等,品种(系)有紫珀、燕山短枝、燕山早丰、迁西晚红;第 3 类抗旱性较弱,品种(系)有迁西早红、迁西壮栗。

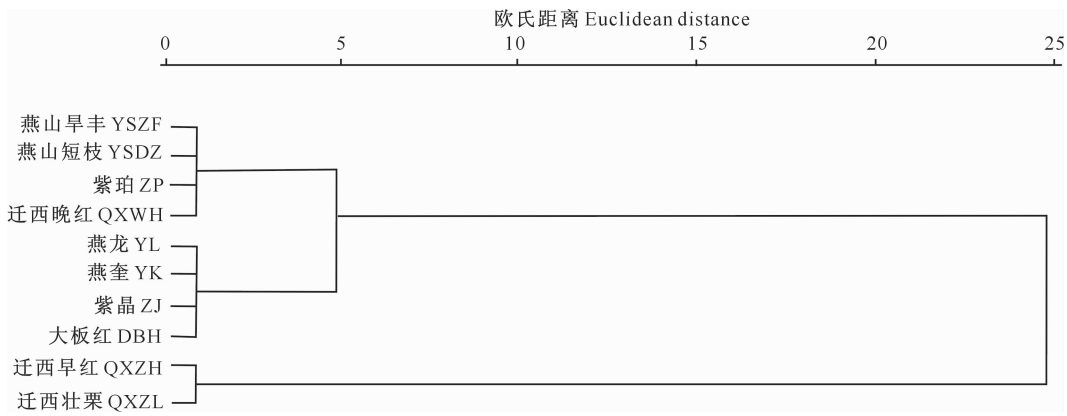


图 1 10 个板栗品种(系)抗旱性的聚类分析

Fig. 1 Clustering analysis on drought stress resistance of ten Chinese chestnut varieties (clones)

3 讨论与结论

叶片的形态及解剖结构是叶片与环境条件长期作用的结果^[19],其可较好地反映植物对于干旱等逆境条件的适应性。相关研究表明,较厚的叶片有利于水分的保存,因此抗旱性较强^[20]。刘捷平^[21]、薛智德等^[22]认为,叶片角质层可以减少水分的蒸发,增加对光照的折射率,起到一定的抗旱作用。刘红茹等^[23]发现,叶片表皮越厚,越不利于水分散失,植物抗旱性越强。徐扬等^[24]认为,叶片栅栏组织的紧密结构,有利于水分的储存,且其中含有大量的叶绿体,有利于光合作用的进行,因而栅栏组织越发达,植株的抗旱性越强;海绵组织中结构疏松,有利于水分散失;植物叶片栅栏组织结构紧密度越大或叶片海绵组织结构疏松度越小,则栅栏组织所占的比例越大,植株越抗旱。本研究中,10 个板栗品种(系)抗旱机制不同,其中紫晶通过提高栅栏组织与海绵组织的比值来抵御干旱环境;大板红通过增加叶片上表皮及栅栏组织厚度来提高抗旱性;燕龙通过增加叶片角质层厚度及叶片中栅栏组织结构紧密度来抵御旱害;燕奎通过增加叶片厚度及栅栏组织厚度来提高抗旱性;燕山早丰通过增加下表皮及下角质层厚度来抵御干旱。

相关研究表明,气孔小而多者,抗旱性强,这是因为一方面水分充足时可以提高光合效率,另一方面水分缺乏时可以减少水分散失^[7,11,25-26]。但也有学者认为,气孔少,反而抗旱性弱,因为气孔密度与

气体交换阻力成反比,气孔密度小,气体交换阻力增大,蒸腾作用减小^[27]。本研究结果表明,抗旱性较强的燕龙叶片表皮气孔长度、宽度较小,而抗旱性较差的迁西早红、迁西壮栗叶片表皮气孔长度较大,抗旱性较强的紫晶气孔开张宽度最大,这可能是因为不同品种(系)在干旱环境中采取的抗旱机制不同。结合叶片解剖结构发现,燕龙上表皮角质层较厚,气孔较小而密度较大,说明其抗旱机制除了增加叶片角质层厚度及叶片中栅栏组织比例外,还包括控制气孔大小和密度;燕奎叶片厚度、栅栏组织较厚,气孔较小,说明其除了增加叶片厚度及栅栏组织厚度外,也通过控制气孔大小来抵御干旱;燕山早丰下表皮及下表皮角质层较厚,气孔密度最大,说明其除了增加表皮及角质层厚度外,也通过控制气孔密度来抵御干旱。

10 个板栗品种(系)叶片各项指标的大小顺序并不一致,可见在研究抗旱性时,不能单凭某一项指标来进行评价^[27-31]。因此,采用基于多项指标的隶属函数法进行抗旱性研究具有一定的可行性。同时,根据主成分分析确定各指标的权重,可提高抗旱性评价的准确性。本试验通过分析得出,所选择的 15 项指标反映抗旱性的能力并不相同,从大到小的顺序为:叶片海绵组织结构疏松度、栅栏组织厚度、栅海比、叶片栅栏组织结构紧密度、海绵组织厚度、叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、气孔开张宽度、气孔密度、气孔开张长度、气孔长度、下表皮角质层厚度、气孔宽度、上表皮角质层厚度。聚类分析表

明,10 个板栗品种(系)可分为 3 个类型,抗旱性强者为紫晶、大板红、燕龙、燕奎;抗旱性中的为紫珀、燕山短枝、燕山早丰、迁西晚红;抗旱性弱的为迁西早红、迁西壮栗。

综上所述,叶片解剖结构指标能较好地反映板栗的抗旱特性,可用于板栗抗旱性的鉴定与评价。本研究选择的 10 个板栗品种(系)中,紫晶、大板红、燕龙、燕奎的抗旱性最强,可在迁西地区广泛种植。

[参考文献]

[1] Gower S T, Vogt K A, Grier C C. Carbon dynamics of rocky mountain fougla-s-fir influence of water and nutrient availability [J]. Ecological Monographs, 1992, 62: 43-65.

[2] Cramer G R, Urano K, Delrot S, et al. Effects of abiotic stress on plants; asystems biology perspective [J]. BMC Plant Biology, 2011, 11: 163.

[3] 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.

Li Q F, Wang B J, An L H, et al. Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2062-2070.

[4] 逯永满, 姜彦成. 中国海馨栗属叶片特征及其抗旱性 [J]. 新疆农业科学, 2010, 47(10): 2063-2067.

Lu Y M, Jiang Y C. Studies on characters and drought resistance of leaf of Chinese *Glaucium* L. [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(10): 2063-2067.

[5] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.

Yu X L, Ren X S. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Statistics Press, 2008.

[6] 潘 昕, 邱 权, 李吉跃, 等. 基于叶片解剖结构对青藏高原 25 种灌木的抗旱性评价 [J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 61-68.

Pan X, Qiu Q, Li J Y, et al. Drought resistance evaluation based on leaf anatomical structures of 25 shrubs on the Tibetan Plateau [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(2): 61-68.

[7] 翟晓巧, 任媛媛, 刘艳萍, 等. 8 种落叶乔木抗旱性相关叶片的解剖结构 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(9): 42-45.

Zhai X Q, Ren Y Y, Liu Y P, et al. Drought resistance of eight deciduous trees and anatomical structure of leaves [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(9): 42-45.

[8] 张 义, 王得祥, 宋 彬, 等. 基于叶片解剖结构的西宁市 11 种城市森林植物抗旱性评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 86-92.

Zhang Y, Wang D X, Song B, et al. Leaf anatomical structure based drought resistance evaluation of 11 urban forest plants in Xining city [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2014, 42(8): 86-92.

[9] 杨建昌, 乔纳圣. 水分胁迫对水稻叶片气孔频率、气孔导度及脱

落酸含量的影响 [J]. 作物学报, 1995, 21(5): 533-539.

Yang J C, Qiao N S. The influence of water stress on rice leaf stomatal frequency, stomatal conductance and abscisic acid content [J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(5): 533-539.

[10] 史晓霞, 张国芳, 孟 林, 等. 马蔺叶片解剖结构特征与其抗旱性关系研究 [J]. 植物研究, 2008, 28(5): 584-588.

Shi X X, Zhang G F, Meng L, et al. Relationship between the leaf tissue characteristic and drought resistance of *Iris lactea* Pall var. *chinensis* (Fisch) [J]. Bulletin of Botanical Research, 2008, 28(5): 584-588.

[11] 赵姝丽, 陈温福, 徐正进. 水分胁迫对水稻剑叶气孔特性的影响 [J]. 华北农学报, 2010, 25(1): 170-174.

Zhao S L, Chen W F, Xu Z J. The effects of drought stress on stomatal characters of rice leaf [D]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(1): 170-174.

[12] 刘红茹, 冯永忠, 王得祥, 等. 延安 5 种木犀科园林植物叶片结构及抗旱性研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 75-81.

Liu H R, Feng Y Z, Wang D X, et al. Drought resistance and leaf structures of five *Oleaceae* ornamental plants in Yan'an [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2013, 41(2): 75-81.

[13] 李 钧. 华北地区板栗主栽品种抗旱生理研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006

Li J. Study on the physiological responds to drought stress of *Castanea mollissima* Bl. cultivars in north China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.

[14] 时忠杰, 杜阿朋, 胡哲森, 等. 水分胁迫对板栗幼苗叶片活性氧代谢的影响 [J]. 林业科学研究, 2007, 20(5): 683-687.

Shi Z J, Du A P, Hu Z S, et al. Effect of soil water stress on active oxygen metabolism of chestnut seedling leaves [J]. Forest Research, 2007, 20(5): 683-687.

[15] 郑 龙, 王陆军, 傅松玲, 等. 不同板栗品种的耐热性和抗旱性比较 [J]. 安徽农业大学学报, 2015, 42(3): 372-374.

Zheng L, Wang L J, Fu S L, et al. Heat and drought tolerance in different chestnut cultivars [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2015, 42(3): 372-374.

[16] 武燕奇, 郭素娟. 10 个板栗砧木品种(系)抗旱性综合评价 [J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(10): 9-16.

Wu Y Q, Guo S J. Physiological response of five Chinese chestnut varieties of drought stress and evaluation of drought resistance [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 47(10): 9-16.

[17] 周 仪. 植物形态解剖实验 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1993: 37-68.

Zhou Y. Plant morphological anatomy experiment [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1993: 37-68.

[18] 刘杜玲, 彭少兵, 孙红梅, 等. 早实核桃不同品种抗寒性综合评价 [J]. 园艺学报, 2015, 41(3): 545-553.

Liu D L, Peng S B, Sun H M, et al. Comprehensive evaluation on drought resistance of early fruiting walnut cultivars [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 41(3): 545-553.

- [19] 吴丽君,李志辉,杨模华,等. 赤皮青冈幼苗叶片解剖结构对干旱胁迫的响应 [J]. 应用生态学报,2015,26(12):3619-3626.
Wu L J,Li Z H,Yang M H,et al. Response of leaf anatomical characteristics of *Cyclobalanopsis gilva* seedlings to drought stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(12):3619-3626.
- [20] 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.
Guo G G,Feng B,Ma B L,et al. Leaf Anatomical structures of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall. and their drought resistance analysis [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2013,33(4):720-728.
- [21] 刘捷平. 植物形态解剖学 [M]. 北京:北京师范学院出版社,1991.
Liu J P. Plant morphological anatomy experiment [M]. Beijing:Beijing Normal University Press,1991.
- [22] 薛智德,韩蕊莲,侯庆春,等. 延安地区 5 种灌木叶旱性结构的解剖研究 [J]. 西北植物学报,2004,24(7):1200-1206.
Xue Z D,Han R L,Hou Q C,et al. Anatomical study of xeromorphism of leaves in cutting for five brushes in Yan'an region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2004,24(7):1200-1206.
- [23] 刘红茹,冯永忠,王得祥,等. 延安城区 10 种阔叶园林植物叶片结构及其抗旱性评价 [J]. 西北植物学报,2012,32(10):2053-2060.
Liu H R,Feng Y Z,Wang D X,et al. Drought resistance evaluation and leaf structures of ten species of broad-leaved ornamental plants in Yan'an urban area [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2012,32(10):2053-2060.
- [24] 徐 扬,陈小红,赵安玖. 川西高原 4 种苹果属植物叶片解剖结构与其抗旱性分析 [J]. 西北植物学报,2015,35(11):2227-2234.
Xu Y,Chen X H,Zhao A J. Drought resistance evaluation and leaf anatomical structures of four species of *Malus* plants in western Sichuan Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2015,35(11):2227-2234.
- [25] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱特性的研究 [D]. 北京:北京林业大学,1990.
Li J Y. Drought characteristics research of Taihang mountain main afforestation tree species [D]. Beijing:Beijing Forestry University,1990.
- [26] 史俊燕,樊金栓,武建林. 3 种核桃嫁接方法对比试验 [J]. 经济林研究,2008,26(1):82-85.
Shi J Y,Fan J S,Wu J L. Comparison of three walnut grafting methods [J]. Nonwood Forest Research,2008,26(1):82-85.
- [27] 张盼盼,慕 芳,宋 慧,等. 糜子叶片解剖结构与其抗旱性关联研究 [J]. 农业机械学报,2013,44(5):119-126.
Zhang P P,Mu F,Song H,et al. Anatomical structure and drought resistance in broomcorn millet leaf [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):119-126.
- [28] 刘 滨,彭 励,郑丽萍,等. 宁夏 10 种观赏灌木叶片解剖结构及其抗旱性综合评价 [J]. 西北植物学报,2013,33(9):1808-1816.
Liu B,Peng L,Zheng L P,et al. Drought resistance study of 10 major ornamental shrub in Ningxia [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2013,33(9):1808-1816.
- [29] 赵延霞,骆有庆,宗世祥,等. 不同沙棘品种雌雄株叶片解剖结构及抗旱性比较 [J]. 北京林业大学学报,2012,34(6):34-41.
Zhao Y X,Luo Y Q,Zong S X,et al. Leaf anatomical structure and drought resistance of different sex and varieties of sea buckthorn [J]. Journal of Beijing Forestry University,2012,34(6):34-41.
- [30] 任媛媛,刘艳萍,王 念,等. 9 种屋顶绿化阔叶植物叶片解剖结构与抗旱性的关系 [J]. 南京林业大学学报,2014,38(4):64-68.
Ren Y Y,Liu Y P,Wang N,et al. The relationship between leaf anatomic structure and drought resistance of nine broad-leaved plants [J]. Journal of Nanjing Forestry University,2014,38(4):64-68.
- [31] 白重炎,高尚风,张 颖,等. 12 个核桃品种叶片解剖结构及其抗旱性研究 [J]. 西北农业学报,2010,19(7):125-128.
Bai C Y,Gao S F,Zhang Y,et al. Analysis of anatomical leaf structure and drought resistance in 12 varieties of walnut [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2010,19(7):125-128.