

doi:10.11937/bfyy.20164561

文冠果幼苗叶片解剖结构和光合作用对干旱胁迫的响应

赵雪¹, 张秀珍², 牟洪香¹, 贺红月¹, 杨可伟¹, 单媛媛¹

(1. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2. 青岛冠中生态股份有限公司, 山东 青岛 266101)

摘要:以辽宁省朝阳市和河北省石家庄市文冠果种源地培育出的一年生幼苗为研究对象,设置适宜水分、中度干旱和重度干旱3个土壤水分梯度,通过盆栽称重控水方法控制土壤含水量,采用LI-6400光合仪进行光合指标的测定,并依据石蜡切片技术,研究干旱胁迫下不同种源文冠果光合特性及叶片解剖结构特征。结果表明:干旱胁迫下2个种源文冠果光合参数整体呈下降趋势;随着干旱胁迫的加剧,叶绿素含量呈下降趋势;随干旱程度的加剧,2个种源文冠果通过减小叶片厚度、增加栅栏组织厚度及减小海绵组织厚度等途径来提高其抗旱能力。

关键词:文冠果;干旱胁迫;光合作用;解剖结构

中图分类号:S 667.904⁺.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)13-0038-07

随着全球气候变迁,干旱发生频繁,水分短缺成为干旱地区限制植物生产力的主要因素^[1]。干旱影响着植物的生长发育,叶片是植物暴露在外表面积最大的器官,也是植物进化过程中对环境变化比较敏感且可塑性较大的器官,在不同的环境压力下因适应环境而改变形态及结构,所以结构特征最能体现环境因子与植物的协同进化^[2]。结构是功能的基础,植物结构的变化必然会直接影响到植物生理生态功能的改变^[3]。当水分条件长期不能够满足植物生长所需,必然会导致叶片生理结构发生变化^[4]。因此,了解植物叶片解剖结构对水分胁迫的响应是探索植物对水分条件变

化的适应机制的基础。土壤水分是影响植物光合作用、水分代谢及物质转运等光合生理过程的重要生态因子,水分胁迫下光合效率显著降低、生长受抑^[5]。对于植物叶片光合作用来说,干旱会导致气孔关闭,影响光合底物二氧化碳的吸收,从而导致光合作用减弱;干旱胁迫还能导致叶肉细胞损伤、降低光合酶的活性,从而使植物光合速率降低。而光合作用是植物生长的基础,是植物生产力构成的最主要因素^[6]。研究干旱胁迫下叶片的解剖结构特征以及光合特性因子的变化规律,对于了解植物的耐旱原因,揭示植物的耐旱机制,干旱半干旱地区造林树种的选择均具有重要的指导意义。

文冠果(*Xanthoceras sorbifolia* Bunge)属无患子科文冠果属落叶灌木或小乔木,又名文官果、僧灯毛道等^[7],主要分布在甘肃、陕西、山西及河北等地,纬度跨度29°~47°^[8],其种子含油量高,是我国北方特有的木本油料树种^[9]。以往学者针对文冠果繁殖技术、开发利用等方面开展了广泛研究^[10-12],光合生理特性及叶片解剖结构方面也有相关报道^[13-14],但对于干旱胁迫下文冠果叶片

第一作者简介:赵雪(1990-),女,河北三河人,硕士研究生,研究方向为城市林业。E-mail:zhaoxue_rain@163.com

责任作者:牟洪香(1976-),女,山东平度人,博士,副教授,硕士生导师,现主要从事能源植物的开发与利用以及林木栽培生理等研究工作。E-mail:mouhongxiang@hebau.edu.cn

基金项目:林学学科创新基金资助项目(LXXK2014-1)。

收稿日期:2017-03-13

结构的研究鲜见报道。该试验以 2 个种源文冠果幼苗为试材,采用盆栽控制试验,研究不同土壤水分梯度下文冠果幼苗叶片结构和光合特征,探讨其叶片结构和光合特性对土壤水分梯度的响应规律,以期阐明文冠果适应干旱环境的生理机制,并为文冠果的推广应用以及干旱地区造林树种选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北省保定市河北农业大学标本园内,该地区属暖温带半湿润大陆季风气候,年平均气温 12℃,年平均降水量 529.7 mm,无霜期 165~210 d。

1.2 试验材料

供试材料为辽宁省朝阳市建平县和河北省石家庄市新华区 2 个种源地种子繁育的文冠果幼苗,建平县平均海拔 412 m,年平均降水量 614.7 mm,平均温度 7.6℃,无霜期 137 d;新华区平均海拔 77.9 m,年平均降水量 534.6 mm,平均温度 13.3℃,无霜期 197 d。

1.3 试验方法

2015 年 4 月将文冠果种子用 50℃温水进行催芽处理,待 1/3 种子露白时,播种于营养杯中。2015 年 6 月将长势一致的幼苗栽植到无孔的塑料花盆(盆高 25 cm,口径 31 cm,底径 21 cm),每盆 2 株幼苗,每种源各 24 盆。设置 3 个水分胁迫:适宜水分(土壤含水量为 14.76%~15.81%,CK);中度干旱(土壤含水量为 9.49%~10.54%,W1);重度干旱(土壤含水量为 6.32%~7.38%,W2),同种源每个水分处理 8 次重复。待达到预设水分含量,采用电子秤称重法,持续干旱胁迫 28 d 后进行各项指标的测定。

1.4 项目测定

1.4.1 光合特性的测定

选择晴朗无云无风天气,于 09:00—11:00,采用 LI-6400 光合仪进行文冠果叶片净光合速率(P_n)、气孔导度($Cond$)、胞间 CO_2 浓度(C_i)以及蒸腾速率(Tr)的测定。每种源不同干旱胁迫处理各选 3 盆,每盆选取 3 片成熟叶进行测定。

1.4.2 叶绿素含量的测定

叶绿素含量采用丙酮-乙醇混合液法^[15]测定,丙酮、乙醇按 1:1 比例混合,直接浸泡叶片提取叶绿素,待叶片完全变白后,使用紫外分光光度计测定其在 663、645 nm 下的光密度值。

1.4.3 叶片解剖结构的测定

采用石蜡切片方法,采取完整无病虫害的成熟叶片清洗干净并用纱布擦干,于叶片中央垂直中脉位置,切取大小约为 1 cm×1 cm 的小叶片,并立即放入 FAA 固定液内(48 h 以上)。经历脱水、浸蜡、包埋、修块、粘片、染色、固定过程,切片厚度为 8 μm ,在 Motic BA210 光学显微镜下观察,并使用 Motic Images Advanced 3.2 高级图像处理软件进行测量与拍照。不同处理选取 6 个完好切片,每个切片上选取 3 个视野进行观察。叶片组织结构紧密度 CTR(cell tense ratio,%) 和叶片组织结构疏松度 SR(spongy ratio,%) 根据公式计算:CTR(%)=栅栏组织厚度/叶片厚度×100;SR(%)=海绵组织厚度/叶片厚度×100。

1.5 数据分析

试验数据处理采用 Microsoft Excel 2003 软件进行整理与计算,之后运用 SPSS 17.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同种源文冠果幼苗光合生理特性的影响

从表 1 可以看出,2 个种源文冠果幼苗随着干旱胁迫程度的加深,净光合速率、气孔导度和蒸腾速率都呈下降趋势;建平地区的文冠果幼苗叶片胞间 CO_2 浓度随着干旱胁迫程度的加深呈显著下降趋势,新华地区的文冠果幼苗胞间 CO_2 浓度呈先下降后上升的趋势,但各处理间差异不显著;不同干旱胁迫下,各种源文冠果净光合速率差异极显著($P<0.01$),其中新华种源的文冠果在重度干旱胁迫下,叶片净光合速率($2.54 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)下降为在适宜水分情况下净光合速率($14.43 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)的 17.60%。在重度干旱胁迫下新华地区的文冠果种源叶片胞间 CO_2 浓度上升,但净光合速率的下降,说明净光合速率的下降可能是由于非气孔限制所导致的。

由表1同样可以看出,2个地区种源的文冠果在重度干旱胁迫下,气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率种源间差异不显著,而净光合速率存

在显著差异;在适宜水分下,建平种源文冠果的净光合速率为 $12.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,显著低于新华种源文冠果。

表1 各种源文冠果叶片光合参数应对不同干旱胁迫的变化

Table 1 Change of various sources of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge leaf photosynthetic parameters under different drought stress

项目 Items	种源 Provenances	CK	干旱处理 Drought treatment W1	W2
净光合速率 Pn / $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	建平	12.22±0.32Ba	4.46±0.11Bb	3.78±0.33Ac
	新华	14.43±0.54Aa	7.90±0.62Ab	2.54±0.18Bc
气孔导度 Cond / $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	建平	0.212±0.011Aa	0.049±0.003Bb	0.040±0.006Ab
	新华	0.209±0.004Aa	0.108±0.008Ab	0.042±0.001Ac
胞间CO ₂ 浓度 Ci / $(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	建平	256.09±6.03Aa	250.95±4.05Aa	235.84±6.38Ab
	新华	239.41±2.07Ba	235.91±3.45Aa	244.08±4.84Aa
蒸腾速率 Tr / $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	建平	6.32±0.17Ba	2.24±0.12Bb	1.77±0.26Ab
	新华	8.01±0.29Aa	5.04±0.35Ab	1.93±0.14Ac

注:表中数据为测定平均值±标准误差;不同大写字母表示相同干旱胁迫下不同种源间显著差异($P<0.01$);不同小写字母表示种源内不同干旱胁迫间显著差异($P<0.05$)。以下同。

Note: The data for the determination of the mean±standard error; different capital letters show under the same drought stress between different provenances of significant differences ($P<0.01$); different lowercase letters show provenances in different drought stress between the significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.2 干旱胁迫对不同种源文冠果叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要细胞器,参与光能的吸收、传递和转化过程,其含量与光合速率有密切关联^[16],因此,人们常把叶绿素含量作为评判植物光合速率的重要指标之一。从图1可以看出,不同干旱胁迫下,新华种源的文冠果幼苗叶片叶绿素含量均都高于建平种源。随着干旱胁迫的加深,2个地区种源的文冠果幼苗的叶绿素含量整体呈显著下降趋势,且在重度干旱胁迫下,建平种源文冠果幼苗叶片叶绿素含量下降最大(13.9%)。

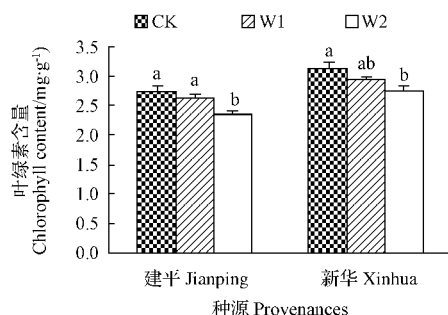


图1 干旱胁迫对不同种源文冠果叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effect of drought stress on chlorophyll content of different *Xanthoceras sorbifolia* Bunge

2.3 干旱胁迫对不同种源文冠果叶片解剖结构的影响

2.3.1 不同干旱胁迫条件下文冠果幼苗叶片解剖结构特征

从图2及表2可以看出,随着干旱胁迫的加深,2个地区种源幼苗叶片主脉厚度、海绵组织厚度、下表皮厚度、上表皮角质层厚度、主叶脉导管最大直径值及SR均呈下降趋势,栅栏组织厚度与海绵组织厚度之比(以下简称“栅海比”)呈上升趋势。不同干旱胁迫下,建平种源文冠果幼苗叶片主脉厚度各处理间差异极显著($P<0.01$),主叶脉导管最大直径、栅海比在各水分条件下差异显著($P<0.05$),叶片厚度随着干旱胁迫程度的加深呈显著下降趋势,栅栏组织厚度随干旱胁迫程度的加深呈现出先下降后升高的趋势。新华区文冠果幼苗叶片主脉厚度、栅海比、栅栏组织厚度各处理间差异显著($P<0.05$),主叶脉导管最大直径、叶片厚度虽有一定的趋势性,但各处理间差异不显著。综上所述,2个种源文冠果幼苗叶片在干旱胁迫下,通过增加栅海比,减少栅栏组织厚度、叶脉导管最大直径等途径减少水分流失,提高各自的抗旱能力。

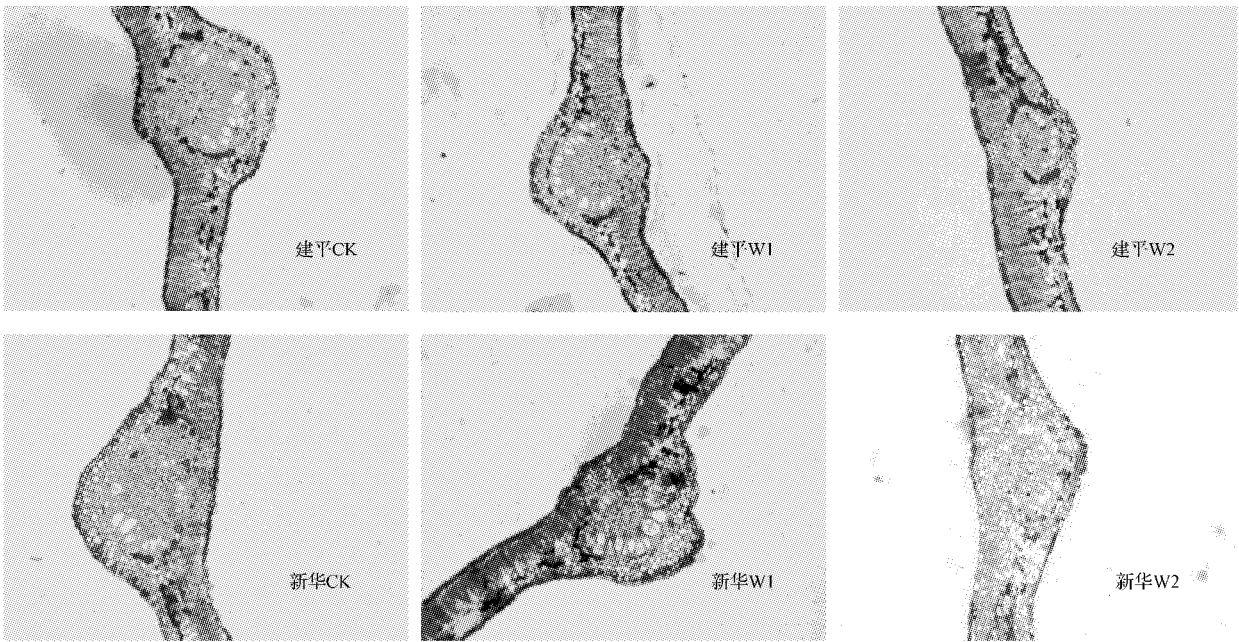


图 2 不同水分条件下各种源文冠果的叶片解剖结构

Fig. 2 Leaf anatomical structure of various sources of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge among different water-treated conditions

表 2

不同水分条件下各种源文冠果叶片解剖结构差异

Table 2 Variance in leaf anatomical structure of various sources of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge among different water-treated conditions

项目	种源	干旱胁迫 Drought stress		
Items	Provenances	CK	W1	W2
主脉厚度	建平	505.43±18.38Aa	332.97±6.18Bb	296.29±2.72Ac
Thickness of principal vein/ μm	新华	427.41±3.36Ba	408.41±10.96Aa	320.39±17.00Ab
叶片厚度	建平	194.85±2.32Aa	167.70±1.33Bb	164.34±1.89Bb
Thickness of lamina/ μm	新华	180.43±1.97Ba	182.07±2.36Aa	179.16±3.02Aa
栅栏组织厚度	建平	96.47±3.83Aa	80.84±1.82Ab	85.70±2.69Bb
Thickness of palisade tissue/ μm	新华	86.25±1.70Bb	86.27±2.04Ab	94.41±1.43Aa
海绵组织厚度	建平	68.38±2.74Aa	55.55±1.65Ab	52.16±1.87Ab
Thickness of spongy tissue/ μm	新华	61.80±1.25Ba	59.87±1.56Ab	56.77±2.46Ab
上表皮厚度	建平	14.81±0.68Aa	13.98±0.66Aa	13.52±0.70Aa
Thickness of adaxial epidermis/ μm	新华	13.21±0.75Aa	13.61±0.74Aa	12.19±0.36Aa
下表皮厚度	建平	11.47±0.36Aa	11.09±0.48Aa	10.37±0.51Aa
Thickness of abaxial epidermis/ μm	新华	10.79±0.45Aa	10.59±0.56Aa	10.05±0.51Aa
上表皮角质层厚度	建平	2.12±0.14Aa	1.98±0.08Aa	1.95±0.13Aa
Thickness of adaxial epidermis of cuticle/ μm	新华	2.21±0.15Aa	2.08±0.12Aab	1.78±0.10Ab
下表皮角质层厚度	建平	1.75±0.15Aa	1.55±0.12Aa	1.39±0.08Ba
Thickness of abaxial epidermis of cuticle/ μm	新华	1.76±0.10Aa	1.61±0.07Aa	1.76±0.09Aa
主叶脉导管最大直径	建平	14.39±0.42Aa	12.60±0.58Ab	10.54±0.35Ac
The maximum diameter of principal vein/ μm	新华	12.05±0.33Ba	11.78±0.34Aa	10.97±0.68Aa
栅栏组织与海绵组织厚度之比	建平	1.41±0.03Ab	1.46±0.04Ab	1.64±0.03Aa
Palisade/Spongy	新华	1.40±0.04Ab	1.44±0.04Ab	1.66±0.06Aa
CTR/%	建平	49.51±1.36Aab	48.21±1.01Ab	52.15±1.15Aa
	新华	47.80±2.24Aab	47.38±1.52Ab	52.70±1.67Aa
SR/%	建平	35.09±0.77Aa	33.12±1.16Aab	31.74±1.24Ab
	新华	34.25±2.33Aa	32.88±0.79Aa	31.69±1.65Aa

2.3.2 干旱胁迫下文冠果幼苗叶片解剖结构种源间的差异

从表 2 可以看出,在适宜水分条件下,建平种源的文冠果叶片主脉厚度、叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、主叶脉导管最大直径都显著高于新华种源;在中度干旱胁迫下,新华种源文冠果主脉厚度、叶片厚度显著高于建平种源,栅栏组织厚度和海绵组织厚度虽高于建平种源,但差异不显著,在此水分条件下,主叶脉导管最大直径、栅海比及 CTR 仍是建平种源数值大;在重度干旱胁迫下,新华种源文冠果叶片厚度、栅栏组织厚度、下表皮角质层厚度均显著高于建平种源,在此水分胁迫下,新华文冠果幼苗叶片的栅海比高于建平种源,为建平种源的 101.22%。由上述可知,在重度干旱胁迫下,新华种源的文冠果叶片组织厚度相对建平种源厚,表明新华种源文冠果在重度干旱胁迫条件下保持叶片水分能力相对较强;相比较新华种源,建平种源文冠果应对重度干旱胁迫则通过减小主叶脉导管最大直径及 SR 值等途径来增强其抗旱能力。

2.4 净光合速率与叶片解剖指标的相关性分析

从表 3 可以看出,2 个地区文冠果幼苗叶片的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率都与主脉厚度和海绵组织厚度呈极显著正相关,随着主脉厚度和海绵组织厚度的增加,净光合速率、气孔导度及蒸腾速率随之增大;随叶片厚度的加大,建平地区文冠果幼苗叶片的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率极显著增加,而新华地区文冠果幼苗叶片并未表现出明显的相关关系;新华地区文冠果幼苗叶片净光合速率、气孔导度及蒸腾速率与上表皮角质层厚度呈极显著正相关,与栅栏组织厚度、栅海比呈极显著负相关;建平地区叶片净光合速率、气孔导度及蒸腾速率随主叶脉导管最大直径的增加有极显著增加的趋势,随 CTR 的增大显著减小;除新华地区文冠果叶片的海绵组织厚度与胞间 CO₂ 浓度呈极显著负相关以及建平地区文冠果叶片的主叶脉导管最大直径与胞间 CO₂ 浓度呈显著正相关关系外,胞间 CO₂ 浓度与 2 个地区其它叶片解剖结构无明显相关关系。

表 3

2 个地区文冠果叶片解剖结构参数与光合参数的相关性分析

Table 3

Correlation analysis of leaf anatomical structure and photosynthetic parameters of

Xanthoceras sorbifolia Bunge from two different provenances

解剖结构参数 Anatomical structure parameters	种源 Provenances	光合参数 Photosynthetic parameters			
		Pn	Gs	Ci	Tr
主脉厚度 Thickness of principal vein	建平	0.951 **	0.934 **	0.186	0.902 **
	新华	0.598 **	0.553 **	0.064	0.591 **
叶片厚度 Thickness of lamina	建平	0.904 **	0.893 **	0.123	0.845 **
	新华	-0.067	-0.083	0.154	-0.018
栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue	建平	0.271	0.271	-0.216	0.255
	新华	-0.308 *	-0.408 **	-0.223	-0.339 *
海绵组织厚度 Thickness of spongy tissue	建平	0.809 **	0.795 **	0.055	0.770 **
	新华	0.521 **	0.470 **	-0.385 **	0.429 **
上表皮厚度 Thickness of adaxial epidermis	建平	0.364 *	0.355 *	0.152	0.368 *
	新华	0.274	0.260	0.130	0.273
下表皮厚度 Thickness of abaxial epidermis	建平	0.239	0.226	0.158	0.253
	新华	0.193	0.220	-0.080	0.148
上表皮角质层厚度 Thickness of adaxial epidermis of cuticle	建平	0.300	0.296	-0.103	0.187
	新华	0.372 **	0.442 **	0.277	0.413 **
下表皮角质层厚度 Thickness of abaxial epidermis of cuticle	建平	0.353 *	0.292	-0.035	0.379 *
	新华	0.140	0.175	0.027	0.134
主叶脉导管最大直径 The maximum diameter of principal vein	建平	0.549 **	0.576 **	0.315 *	0.544 **
	新华	0.362 *	0.284	-0.264	0.284
栅海比 Palisade/Spongy	建平	-0.186	-0.221	0.153	-0.223
	新华	-0.485 **	-0.474 **	0.019	-0.458 **
CTR	建平	-0.330 *	-0.324 *	-0.113	-0.449 **
	新华	-0.164	-0.178	-0.112	-0.151
SR	建平	0.278	0.246	-0.006	0.259
	新华	0.185	0.211	0.018	0.196

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

3 讨论与结论

植物长期生活在逆境环境下,叶片是暴露于环境中面积最大的、进行光合和蒸腾作用的器官,对环境因子如水分、温度等的变化反应敏感,为了适应环境,植物自身会产生一系列的特征变化^[17],叶片的结构变化能够清楚反映出干旱环境对植物产生的一系列影响^[18]。

光合作用是植物生长过程中最基本的过程,同时也是对外界环境变化最为敏感的过程^[19]。植物净光合速率下降的影响因素包括气孔限制与非气孔限制^[20]。气孔关闭导致的气孔限制使胞间 CO_2 浓度降低,而由于叶肉细胞光合活性下降导致的非气孔限制则会使胞间 CO_2 浓度升高。许大全^[21-22]认为判断非气孔限制的可依据胞间 CO_2 浓度升高且气孔导度降低。该试验研究表明,随着土壤含水量的降低,2个种源文冠果叶片的净光合速率都随之减小。而新华种源文冠果在重度干旱胁迫下,胞间 CO_2 浓度呈现出上升趋势,且气孔导度随干旱胁迫的加深而下降,因此依据许大全的结论可推测此时光合速率下降可能为非气孔限制所导致。在正常水分条件下叶绿素的含量与光合速率有存在密切关系^[16],光合速率随叶绿素含量的增加而增加。然而在该试验中,随着干旱胁迫程度的加深,叶片中叶绿素含量呈下降趋势,但变化幅度不大,并未表现出与光合速率的密切关系。推测原因可能是由于植物在干旱胁迫的环境下,净光合速率不但受叶绿素含量的制约,同时受胞间 CO_2 浓度以及气孔关闭等因素的影响。

干旱地区的植物具有高度发达的栅栏组织既能防止强光对叶肉细胞的灼伤,又能充分利用衍射光进行光合作用^[23],所以栅栏组织越厚、排列越紧密,则光能利用效率越高^[24];海绵组织排列疏松,具有较强的蒸腾作用;叶片组织结构紧密度(CTR)的值越大,植物的抗旱能力越强,而叶片组织结构疏松度(SR)值越大,则说明植物抗旱能力较弱^[25];叶片上角质层的作用是防止植物体内水分过分蒸发;叶片主脉维管束具有运输水分与养分的作用^[26]。该研究结果表明,通过不同水分处理,2个种源文冠果的叶片解剖结构呈现不同

程度的变化,在适宜水分下,新华种源文冠果叶片栅栏组织与海绵组织厚度比为建平种源文冠果叶片栅栏组织与海绵组织厚度比的99.29%,而在重度干旱胁迫下,建平种源文冠果叶片栅栏组织与海绵组织厚度比为新华种源的98.80%。建平地区文冠果幼苗栅栏组织厚度在中度干旱胁迫下其数值最低,在重度干旱胁迫下厚度有所提升,但仍未超过在适宜水分条件的厚度,这可能是建平地区的文冠果引种河北后理论上有一个过渡适应的过程,在此期间又遭受干旱胁迫,因而会暂时出现叶片栅栏组织厚度显著降低的现象。随着对环境的适宜,在受到重度干旱胁迫的刺激下,其栅栏组织厚度就会增加。在适宜水分与中度干旱胁迫下,新华种源文冠果的净光合速率明显高于建平种源,而在重度干旱胁迫下,建平种源文冠果叶片净光合速率显著高于新华种源。植物应对干旱胁迫的环境下,会通过降低光合速率、增强保水及降低失水来应对干旱环境。通过对光合参数与叶片解剖结构的相关性分析,净光合速率与上表皮厚度及海绵组织厚度呈极显著正相关,叶片厚度与气孔导度及胞间 CO_2 浓度呈极显著正相关,与庞杰等^[27]的研究结果一致。

综上所述,在干旱环境下,2个地区种源的文冠果为了适应干旱环境在光合生理及叶片解剖结构上表现出各自的适应性变化,但不同地区的叶片解剖结构以及光合生理指标会出现不同的规律特征,说明不同地区种源文冠果应对干旱胁迫的措施不同。未来的研究应重视叶片解剖结构与植物光合生理指标的研究,更深入的了解植物的抗旱机制。

参考文献

- [1] KLICH M G. Leaf variation in *Laeagnus angustifolia* related to environmental heterogeneity[J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 44: 171-183.
- [2] 王勋陵,王静. 植物叶片结构对环境变化的响应与适用[J]. 植物学报, 2005, 22(增刊): 118-127.
- [3] 王海青,徐柱,祁娟. 禾本科植物叶片比较解剖的研究进展[J]. 草原与草坪, 2009(2): 93-97.
- [4] 董占元,姚云峰,赵金仁,等. 梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey) Bunge) 光合枝细胞组织学观察及其抗逆性特征[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(9): 78-83.
- [5] 王海珍,韩路,徐雅丽,等. 土壤水分梯度对灰胡杨光合作用与抗逆性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 1-11.

- [6] 庞杰,张凤兰,郝丽珍,等.沙芥幼苗叶片解剖结构和光合作用对干旱胁迫的响应[J].生态环境学报,2013,22(4):575-581.
- [7] YANG X D, CHEN J. Plant litter quality influences the contribution of soil fauna to litter decomposition in humid tropical forests, southwestern China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009,41:910-918.
- [8] 牟洪香,侯新村.文冠果的研究进展[J].安徽农业科学,2007,35(3):703-705.
- [9] 齐鑫森,李晓宇,丁蕾,等.文冠果研究进展[J].内蒙古林业科技,2013,39(4):37-41.
- [10] 常月梅,张彩红.文冠果嫁接繁殖技术[J].经济林研究,2013,31(2):154-156.
- [11] 莫保儒,王多锋,戚建莉,等.文冠果不同营养器官扦插繁殖试验研究[J].甘肃林业科技,2014,39(1):18-55.
- [12] 陈鸥,董凤亮,马海渊,等.文冠果油的萃取及理化性质和脂肪酸组成分析[J].北京农学院学报,2013,28(1):78-80.
- [13] 邹佳宝,马明科,张刚,等.文冠果对干旱胁迫的光合生理响应[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):55-60.
- [14] 马小芬,王兴芳,李强,等.不同种源地文冠果叶片解剖结构比较及抗旱性分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(6):92-96.
- [15] 张宪政.植物叶绿素含量测定-丙酮乙醇混合液法[J].辽宁农业科学,1986(3):26-28.
- [16] KANNANGARA C G. Part V I. The mechanism of photosynthesis in common plants[M]//The photosynthetic apparatus. California: Academic Press Inc Press, 1991:302-321.
- [17] KOCSIS M, DAROK J, BORHIDI A. Comparative leaf anatomy and morphology of some neotropical *Rondeletia* (Rubiaceae) species[J]. Plant Systematics and Evolution, 2004,248:205-218.
- [18] 陈昕,徐宜凤,张振英.干旱胁迫下石灰花楸幼苗叶片的解剖结构和光合生理响应[J].西北植物学报,2012,32(1):111-116.
- [19] 蔡海霞,吴福忠,杨万勤.干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响[J].生态学报,2011,31(9):2430-2436.
- [20] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33:317-345.
- [21] 许大全.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯,1997,33(4):241-244.
- [22] 许大全,张玉忠.植物光合作用的光抑制[J].植物生理学通讯,1992,28(4):237-243.
- [23] YAN L, LI H, HE X, et al. Ecological anatomy of nine priority species in ALa San Area[J]. Journal of Inner Mongolia Agriculture University, 2000,21(3):65-71.
- [24] 崔秀萍,刘果厚,张瑞麟.浑善达克沙地不同生境下黄柳叶片解剖结构的比较[J].生态学报,2006,26(6):1842-1847.
- [25] 李宙文,宋瑞芳,王芳,等.不同水分处理对湘西烟草叶片解剖结构的影响[J].安徽农学通报,2015,21(22):29-60.
- [26] 金银根,丁雨龙,王庆亚,等.植物学[M].北京:科学出版社,2010:162-163.
- [27] 庞杰,张凤兰,郝丽珍,等.沙芥幼苗叶片解剖结构和光合作用对干旱胁迫的响应[J].生态环境学报,2013,22(4):575-581.

Effect of Drought Stress on Anatomical Structure and Photosynthesis of *Xanthoceras sorbifolia* Leaves in Seedling

ZHAO Xue¹, ZHANG Xiuzhen², MU Hongxiang¹, HE Hongyue¹, YANG Kewei¹, SHAN Yuanyuan¹

(1. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000; 2. Qingdao Guanzhong Ecological Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266101)

Abstract: Originate from Chaoyang city, Liaoning Province and Shijiazhuang, Hebei Province *Xanthoceras sorbifolia*, produced annual seedlings were used as the research object, growth and physiological characteristics of *X. sorbifolia* seedlings under soil drought stress with three different soil content levels, the suitable moisture, moderate soil drought stress and severe soil drought stress were studied. Using LI-6400 photosynthetic apparatus for the determination of photosynthetic indexes, and on the basis of paraffin sectioning. Drought stress under different provenance of *X. sorbifolia*, characteristics and leaf anatomical structure characteristics were researched. The results showed that, Under the drought stress, the photosynthetic parameters in vary degrees both in the leaves of *X. sorbifolia* were on the decline; with drought stress increasing, the chlorophyll content was on the decline; with the intensification of the drought, the *Xanthoceras sorbifolia* improved the ability of drought resistance by reducing thickness of leaf and spongy tissue, increased the thickness of palisade tissue and other ways.

Keywords: *Xanthoceras sorbifolia*; soil drought stress; photosynthesis; anatomical structure