

DOI: 10.5846/stxb201404280852

朱广龙, 邓荣华, 马茵, 魏学智. 酸枣茎导管对自然梯度干旱生境响应的结构特征. 生态学报, 2015, 35(24): - .

Zhu G L, Deng R H, Ma Y, Wei X Z. Changes in the vessel morphology of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* plants in response to natural drought-gradient ecotopes. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

酸枣茎导管对自然梯度干旱生境响应的结构特征

朱广龙, 邓荣华, 马茵, 魏学智*

山西师范大学生命科学学院, 临汾 041000

摘要: 近期因全球变暖高温干旱事件频发, 严重影响植物的生长发育。逆境中植物的形态结构必定发生改变而得以生存。然而关于不同自然梯度干旱生境中植物导管形态特征变化及其规律方面的研究较少。为此本文以采自烟台、石家庄、银川和吐鲁番地区形成的自然梯度干旱条件下生长的酸枣植株为试验材料, 离析观察酸枣茎次生木质部导管, 研究比较不同干旱条件下酸枣茎中次生木质部导管的结构及适应特征。结果表明: 酸枣茎中次生木质部导管有多种类型, 不同生境中同种导管的比例不同。根据管尾情况可将导管分为三类: 无尾型、一端有尾型和两端有尾型导管, 且在结构上表现出特定的适应特征及规律。从烟台到新疆自然梯度干旱条件下, 茎中环纹导管和螺旋导管的长度、宽度和管径总体呈减小的趋势, 管壁逐渐增厚; 网纹导管的宽度和直径逐渐增大; 梯纹导管的长度总体呈增大的趋势, 管径以宁夏的最大, 新疆的最小; 木纤维的宽度、管径和管壁的厚度逐渐增大。生长在不同自然梯度干旱生境中的酸枣, 其导管结构的变化, 提高了水分和无机盐的输导效率, 可以快速补充酸枣在干旱环境中蒸腾散失的水分, 抵御适应逆境, 保证植株正常生长。

关键词: 酸枣; 导管分子; 解剖结构; 自然梯度干旱生境

Changes in the vessel morphology of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* plants in response to natural drought-gradient ecotopes

ZHU Guanglong, DENG Ronghua, MA Yin, WEI Xuezhi*

College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China

Abstract: With climate change, heat and drought events have become more frequent. A rise in temperature beyond a critical threshold for a period of time sufficient to cause irreversible damage to plant growth and development is defined as high-temperature stress. These events are often accompanied by drought. Water-limited conditions (also referred to as drought) occur when insufficient soil moisture is available to support the average plant growth and production. Plants must alter their morphology to adapt to the stress. However, little is known about the vessel characteristics of plants grown in different natural drought-gradient ecotopes. *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*, which is distributed in the cities of Yantai, Shijiazhuang, Yinchuan, and Tulumfan, was selected for this experiment. The characteristics of vessel elements in the secondary xylem in stems of *Z. jujuba* var. *spinosa* were studied using the isolation method. The results indicated that the stems of *Z. jujuba* var. *spinosa* contain various types of vessels with adaptive traits and regular patterns. The proportions of the vessel types differed among the natural drought-gradient ecotopes. The observed vessels could be divided into three types according to the number of tails: no tail, one tail, and two tails. From Yantai to Xinjiang, the length, width, and diameter of the annular vessels and spiral vessels decreased as the natural drought gradient increased, and the ply of the ductal wall thickened gradually; the width and diameter of reticulate vessels showed an increasing trend; the length of scalariform

基金项目: 自然科学基金(30972396); 山西省自然科学基金项目资助(2009011041-1)

收稿日期: 2014-04-28; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxz3288@163.com

vessels also showed an increasing trend, and the diameter first increased and then decreased (Ningxia is the largest, and Xinjiang is the smallest city); the length, width, and diameter of the xylon also increased gradually. These changes in the stricture of the vessel elements, which improved their efficiency for conducting water and inorganic salts, can quickly supplement the water lost in transpiration in a dry environment, thus improving the plants' resistance to the harsh environment and ensuring normal growth.

Key Words: *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*; vessel element; anatomic structure; natural drought-gradient ecotopes

酸枣 (*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*) 为鼠李科 (Rhamnaceae) 枣属 (*Zizyphus* Mill.) 灌木或小乔木, 适应性强, 从湿润的东部海滨到干旱的西部荒漠, 均能良好生长^[1-2]。目前, 有关酸枣的研究主要集中在化学成分^[3-5]、药理作用^[6]、系统分类学^[7]、组织培养^[8-9]、酸枣结构特征和抗逆性^[10-13]等方面。有关酸枣抗旱性的研究中, 康东东^[1]、梁静^[11]、刘学师等^[14-16]主要研究了酸枣叶片的结构特征以及水分生理对干旱的响应; 战立花等^[17]对酸枣根系构型和活力对极端干旱气候的响应规律进行了研究。然而, 这些研究多集中于酸枣根、叶的结构和相关生理生化指标, 然而关于不同自然梯度干旱环境中酸枣茎中导管结构的适应特征尚未见报道。

干旱是影响植物分布、生存和生长的重要环境因子之一, 植物的形态结构和生理代谢必然会对气候变化产生响应而发生改变^[18]。导管与植物体内水分和无机盐的运输有着直接的关系, 其与植物的生长有着极其重要的作用。不同地区的气候条件、水分状况均可影响木质部导管分子的特征, 使其产生协同进化而适应环境。Carlquist 提出木质部进化的生态学途径, 认为现存植物的木质部中, 结构上的差异是功能适应生长环境进化的结果, 与湿度、蒸腾作用以及机械强度有关^[19]。为此, 本研究以烟台、石家庄、宁夏和新疆不同地域气候、土壤环境形成的梯度干旱生境中生长的野生酸枣为试验材料, 利用导管离析法, 研究酸枣茎次生木质部导管对自然梯度干旱的形态适应特征, 探讨酸枣导管结构与功能对不同气候环境的响应策略及机理, 为酸枣资源的开发利用、植物抗旱机理研究、生态建设及恢复提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

实验材料分别采自山东烟台 (莱山区大庄村)、河北石家庄 (赞皇县北沟村)、宁夏银川 (贺兰山附近)、新疆吐鲁番 (红星农场三队)。烟台的莱山区大庄村 (37°24'N, 121°26'E) 属温带海洋性季风气候, 年降雨量 651.9 mm, 空气湿润系数为 1.65, 样地土壤为壤土, 含水量为 14% 左右。石家庄赞皇县北沟村 (37°42'N, 114°18'E) 属暖温带半湿润季风型大陆性气候, 年降雨量 568 mm, 空气湿润系数为 1.07, 样地土壤为壤土, 含水量为 9% 左右。宁夏银川市贺兰山 (38°31'N, 106°12'E) 属中温带大陆性气候, 年降雨量 200 mm, 空气湿润系数为 0.50, 样地土壤为沙土, 含水量为 2% 左右。新疆吐鲁番市红星农场三队 (42°55'N, 89°11'E) 属大陆性暖温带干旱荒漠气候, 年降雨量 15.6 mm, 空气湿润系数为 0.04, 样地土壤为壤土, 含水量为 4%。样地从东到西 (烟台-石家庄-宁夏-新疆) 构成一个自然的梯度干旱环境 (表 1)。

1.2 实验材料

2010 年 7 月, 按自然气候干旱梯度, 分别选取 4 个采样地 5 年生 (依据芽鳞痕判断树龄) 酸枣植株多年生

表 1 采样地区地理环境及气候特征

Table 1 The geographical environment and climatic characteristics of sampled areas

地点 Site	烟台	石家庄	银川	吐鲁番
经纬度 Longitude and latitude	121°26'E 37°24'N	114°18'E 37°42'N	106°12'E 38°31'N	89°11'E 42°55'N
土壤含水量/% Soil moisture	14	9	2	4
年降水量/mm Annual Precipitation	651.9	568	200	15.6
湿润系数 Humidity coefficient	1.65	1.07	0.50	0.04

茎的次生木质部为材料(植株基部向上第五个节间的部分),随机选取 10 株取样后立即装入 FAA(70%乙醇 90mL,福尔马林 5mL,冰醋酸 5mL)固定液中保存。

1.3 Jeffrey 导管离析法

从每个样地采取的材料经 FAA 固定 24 小时后,随机选取 10 个样品,将其切成 0.5×0.2 cm 大小的木条,转入 Jeffrey 离析液(10%铬酸:10%硝酸=1:1)中,置于 40℃ 的恒温箱中离析 3—5 天。将离析好的材料置于载玻片上,番红染色 5min,制成临时装片,Nikon E200 光学显微镜下观察并拍照^[20],略有改进。

1.4 统计分析

随机取 30 张切片拍照,FSX100 OLYMPS 观察分析图像,导管直径采用 Motic Images Plus 2.0 图像分析软件测定,每个样地统计 100 个数据,然后用 Excel、SPSS13.0 统计软件对数据进行统计分析,Photoshop 软件图像处理,排版。

2 结果与分析

2.1 四个样地酸枣茎中次生木质部导管类型及所占比例

酸枣茎次生木质部导管主要有 5 种类型,分别为螺纹导管、网纹导管、环纹导管、梯纹导管及木纤维。在每个生境中,酸枣茎次生结构中各类导管所占的比例不尽相同。烟台酸枣茎中,木纤维数量最多,占导管总数的 42.65%,梯纹导管、网纹导管和环纹导管数量较少,分别占 10.57%、6.79%和 6.79%;石家庄酸枣茎中则以梯纹导管最少,只占 14.12%;银川酸枣茎中环纹导管数量最多,占 32.39%,梯纹导管数量最少,占 11.18%;吐鲁番酸枣茎中的导管以螺纹导管数量最多,占 29.99%,网纹导管数量最少,仅有 14.15%(表 2)。

表 2 不同地区酸枣茎导管
Table 2 The vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

导管 Vessel	螺纹导管 Spiral vessel	网纹导管 Reticulate vessel	环纹导管 Annular vessel	梯纹导管 Scalariform vessel	木纤维 Xylon	采样地区 Sampling area
比例/%	33.20	6.79	6.79	10.57	42.65	烟台
Proportion	25.02	21.13	23.87	14.12	15.86	石家庄
	20.60	17.65	32.39	11.18	18.18	银川
	29.99	14.15	16.21	16.55	23.10	吐鲁番
导管类型	3	1	1	2	1	烟台
Type of vessel	3	1	3	2	1	石家庄
	3	3	3	2	1	银川
	3	3	2	2	1	吐鲁番
无尾	+	-	-	-	-	烟台
No tail	+	-	+	-	-	石家庄
	+	+	+	-	-	银川
	+	+	+	-	-	吐鲁番
一端有尾	+	+	-	+	-	烟台
One tail	+	-	+	+	-	石家庄
	+	+	+	+	-	银川
	+	+	-	+	-	吐鲁番
两端有尾	+	-	+	+	+	烟台
Two tails	+	+	+	+	+	石家庄
	+	+	+	+	+	银川
	+	+	+	+	+	吐鲁番

+:表示有尾;-:表示无尾。

根据导管管尾的情况,可将酸枣茎的导管可分为三类:无尾型、一端有尾型和两端有尾型导管。在 4 个样

地的导管中,木纤维为两端有尾型;梯纹导管为一端有尾型和两端有尾型;螺纹导管三种类型都有。银川和吐鲁番的梯纹导管为一端有尾型和两端有尾型;烟台的网纹导管为一端有尾型;石家庄的梯纹导管为两端有尾型,银川和吐鲁番的有三种类型;烟台的环纹导管为两端有尾型,吐鲁番的为无尾型和两端有尾型,石家庄和银川的三种类型都有(表2,图1、2、3、4)。

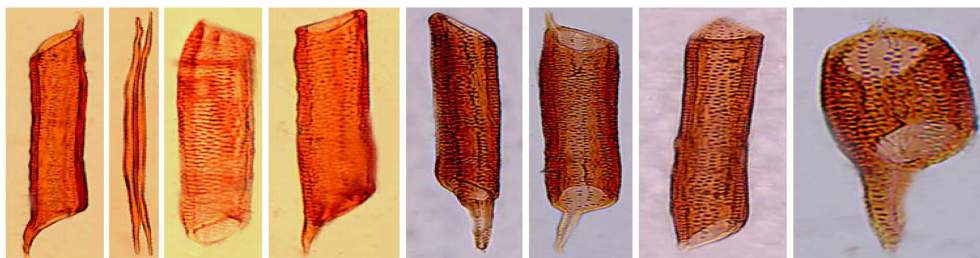


图1 烟台酸枣茎导管

Fig. 1 The vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill.in Yantai

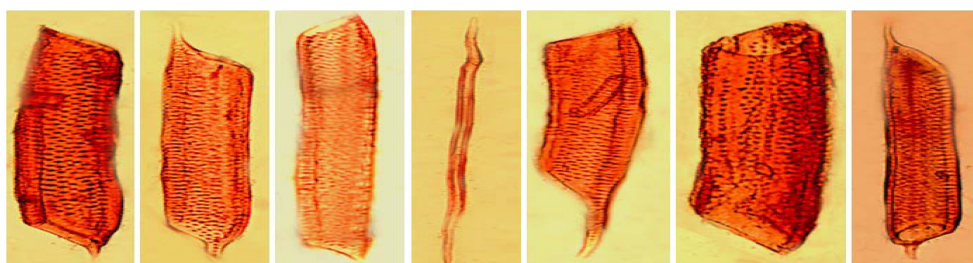


图2 石家庄酸枣茎导管

Fig. 2 The vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill.in Shijiazhuang

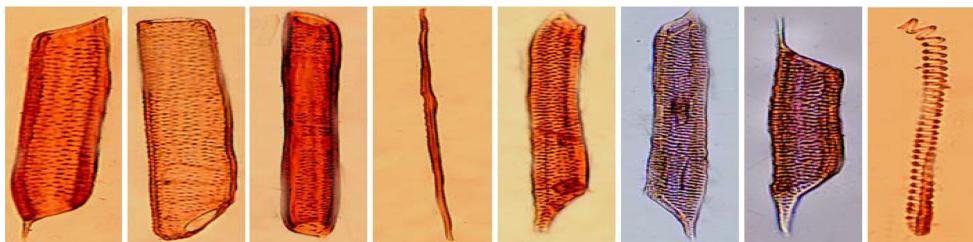


图3 银川酸枣茎导管

Fig. 3 The vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill.in Yinchuan

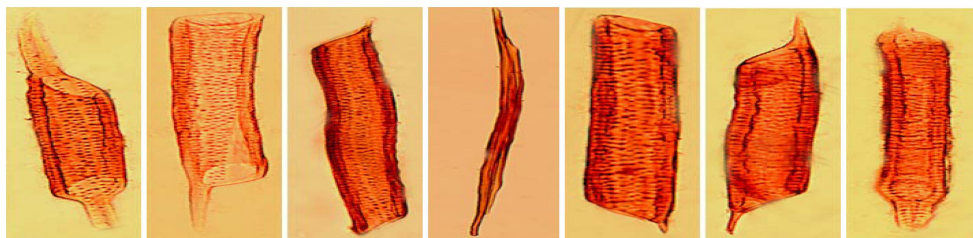


图4 吐鲁番酸枣茎导管

Fig. 4 The vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill.in Tulufan

2.2 四个样地酸枣茎中网纹导管的变化趋势

4个采样地酸枣茎导管中,网纹导管长度以宁夏的最长,其次为烟台酸枣,与烟台酸枣相比,石家庄和新疆网纹导管的长度分别降低了8.27%、3.97%,宁夏酸枣茎中网纹导管的长度增加了7.59% ($P < 0.05$);导管的

宽度和直径呈先升后降的趋势(图5);网纹导管的管壁厚呈减小的趋势,与烟台酸枣中的相比,宁夏和新疆酸枣茎中网纹导管的管壁厚度分别降低了19.2%和25.7% ($P<0.05$)(图6);网纹导管管尾长度以新疆酸枣茎中最长,宁夏的管尾最短(图7)。网纹导管长度,宽度,内径逐渐增大,管壁变薄。

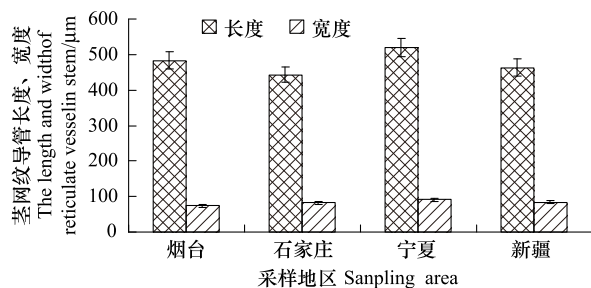


图5 不同地区酸枣茎网纹导管长度、宽度变化

Fig. 5 The length and width of reticulate vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

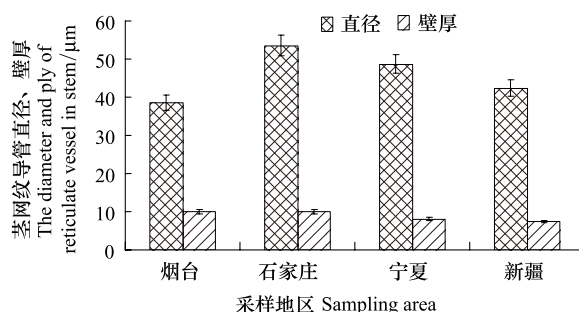


图6 不同地区酸枣茎网纹导管直径、壁厚变化

Fig. 6 The diameter and thickness of reticulate vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

2.3 四个样地酸枣茎中环纹导管的变化趋势

环纹导管以烟台酸枣茎中的最长,石家庄、宁夏、新疆的环纹导管的长度分别降低了11.59%、3.86%、17.59% ($P<0.05$);环纹导管的宽度以宁夏酸枣中的最大,烟台、石家庄和新疆环纹导管的宽度分别比烟台的减少了16.86%、18.49%,宁夏茎环纹导管的宽度增加了3.72% ($P<0.05$)(图8);从烟台到新疆,环纹导管的直径逐渐减小(图9);而环纹导管的管壁逐渐增厚,与烟台相比,石家庄、宁夏、新疆的管壁厚度分别增加了0.56%、39.3%、64.37% ($P<0.05$)(图9);茎环纹导管长度、管径变小,管壁增厚。

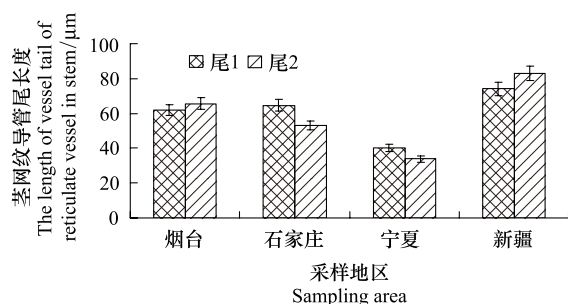


图7 不同地区酸枣茎网纹导管尾长度

Fig. 7 The length of tail of reticulate vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

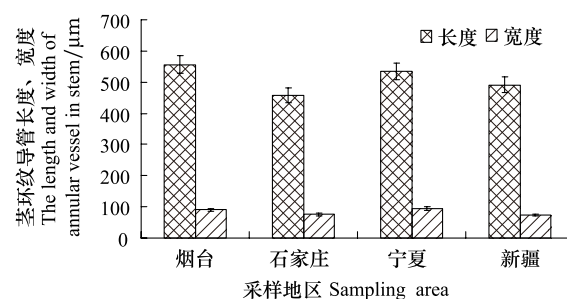


图8 不同地区酸枣茎环纹导管长度、宽度变化

Fig. 8 The length and width of annular vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

2.4 四个样地酸枣茎中螺纹导管的变化趋势

螺纹导管以宁夏的最长,石家庄和新疆分别比烟台的减小了11.67%、18.48% ($P<0.05$);茎螺纹导管宽度和直径呈减小的趋势(图10);螺纹导管的管壁逐渐增厚,与烟台相比,石家庄、宁夏、新疆螺纹导管管壁厚度分别增大了20.3%、4.25%、33.47% ($P<0.05$)(图11)。螺纹导管长度、宽度减小,管径变小,管壁逐渐增厚。

2.5 四个样地酸枣茎中梯纹导管的变化趋势

茎梯纹导管长度总体呈增加的趋势;与烟台酸枣茎中的相比,宁夏梯纹导管的宽度增加了6.12%,石家庄和新疆的分别减小了2.45%和20.54% ($P<0.05$)(图12);从烟台到新疆,茎梯纹导管直径先增大后变小,与烟台的相比,石家庄和宁夏的管径分别增大了31.9%和54.76%,新疆的减小了17.12% ($P<0.05$);管壁厚度呈减小的趋势(图13);茎梯纹导管的管尾长度一端变短,另一端加长,与烟台相比,石家庄、宁夏、新疆的管尾1分别减少了15.92%、24.57%和38.01% ($P<0.05$),管尾2石家庄的减少了24.90%,宁夏和新疆的分别增加了54.36%和116.39% ($P<0.05$)(图14)。

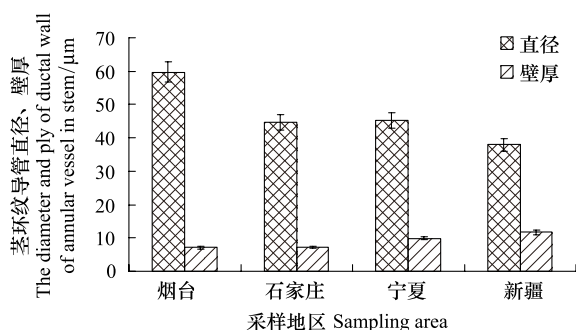


图9 不同地区酸枣茎环纹导管直径、壁厚变化

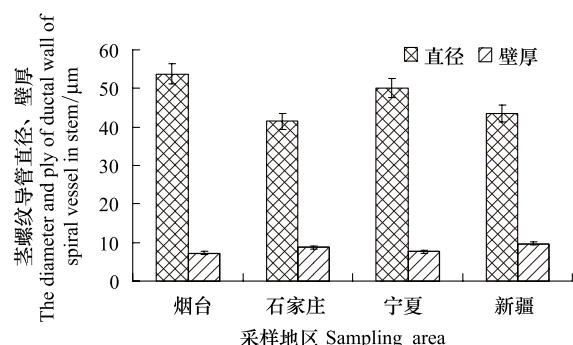
Fig. 9 The diameter and thickness of annular vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

图11 不同地区酸枣茎螺旋纹导管直径、壁厚变化

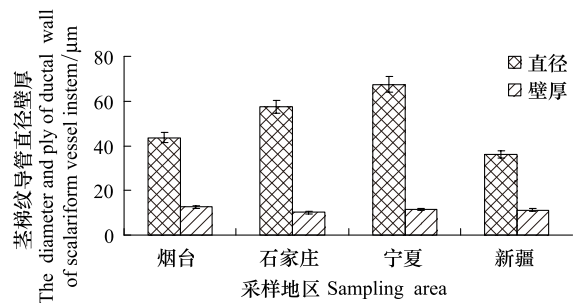
Fig. 11 The diameter and thickness of spiral vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

图13 不同地区酸枣茎梯纹导管直径、壁厚变化

Fig. 13 The diameter and thickness of scalariform vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

2.6 四个样地酸枣茎中木纤维的变化趋势

木纤维以石家庄酸枣植株茎中的最长,和烟台的相比其增大了 11.39%,宁夏的茎木纤维最短,减小了 3.13%,而新疆的增大了 5.64% ($P < 0.05$) (图 15);随各生境梯度干旱的加剧,木纤维的宽度、直径和壁厚都表现出增加的趋势,尤其是木纤维的宽度,石家庄、宁夏和新疆生境中的显著增加,在干旱逆境中,木纤维逐渐向短而宽的趋势进化 (图 16)。

3 结论与讨论

从湿润的东海之滨到干旱的西部内陆腹地 (烟台、石家庄、银川、吐鲁番),年降水量、湿润系数等气候参数呈梯度变化,构成一个的连续的、大尺度的自然干旱环境梯度带,是一个研究植物抗旱性非常理想的天

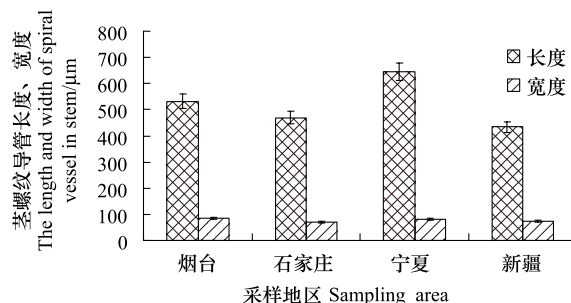


图10 不同地区酸枣茎螺旋纹导管长度、宽度变化

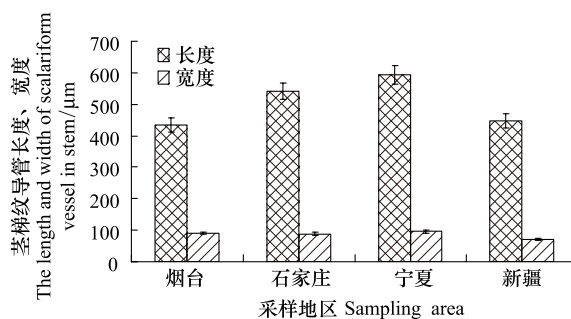
Fig. 10 The length and width of spiral duct of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

图12 不同地区酸枣茎梯纹导管长度、宽度变化

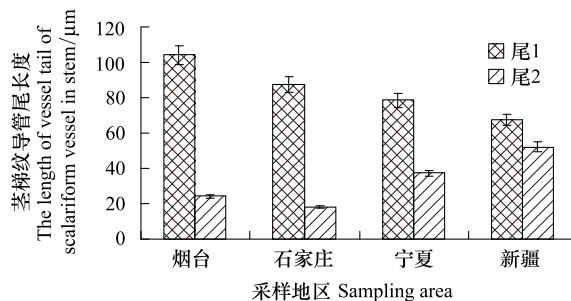
Fig. 12 The length and width of scalariform vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

图14 不同地区酸枣茎梯纹导管尾长度变化

Fig. 14 The length of tail of scalariform vessel of stem of *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

然实验场。酸枣作为该实验场的广生态幅物种,是理想的实验材料。生长在不同气候及水分条件下的酸枣,其茎次生木质部导管类型、导管比例、结构特点也必然受到这些因子的影响和制约,形成不同地区导管特有的适应特点,这是生物在长期进化过程中与环境协同进化的结果。

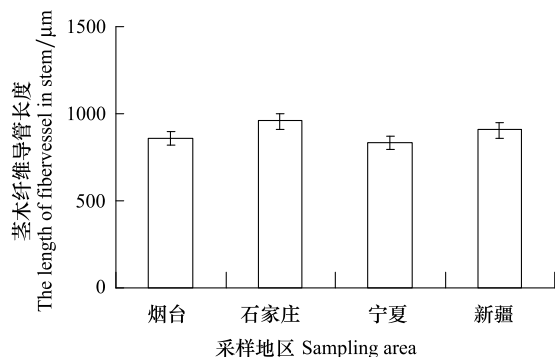


图 15 不同地区酸枣茎木纤维长度变化

Fig. 15 The length of xylon vessel of stem Of *Zizyphus jujuba* Mill.in differert regions

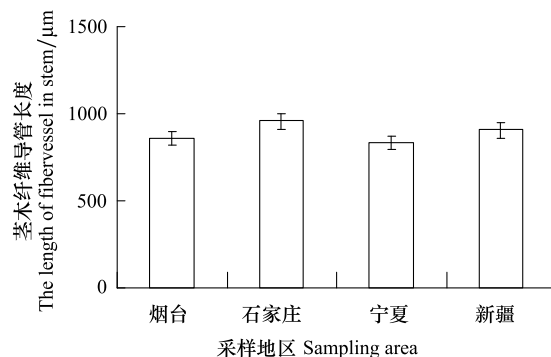


图 16 不同地区酸枣茎木纤维宽度、直径、壁厚变化

Fig. 16 The width ,diamete and thickness of xylon vessel of stem Of *Zizyphus jujuba* Mill.in differert regions

导管是运输水分和无机盐的重要器官,与植物的生长发育密切相关。在许多植物中,环纹导管和螺纹导管出现在早期的个体发育中,可以适应器官的生长。然而这两种导管的直径较小,输水效率相对较弱。梯纹和网纹导管普遍出现在器官停止伸长的次生木质部内,其直径大,输水效率高,为被子植物主要的输水组织^[21]。从演化上看,导管分子长度越短越进化,口径越宽越进化^[22],导管分子宽度越小,输导水分的阻力越大^[23-24]。水分运输阻力的大小与导管长度也有关,房凯等研究发现,水分长距离运输的阻力与导管长度倒数呈极显著的线性关系^[25]。本研究发现从烟台到新疆,茎中相对保守、输水效率相对较弱的导管分子类型:环纹导管和螺纹导管的长度、宽度和管径总体呈减小的趋势(宁夏茎环纹导管宽度最大,螺纹导管长度最长),管壁逐渐增厚。随着干旱程度的增加,茎中环纹和螺纹导管分子趋于短导管,窄口径和厚管壁方向进化,这种进化增强了导管分子的抗负压能力和木质部输导组织的机械支持力,从而阻滞了水流的横向扩散,减少了水分的蒸发,更能满足酸枣生长发育对水分和无机盐的需求,这一特征可能是酸枣抗旱性较强的细胞解剖学依据^[26]。

网纹导管和梯纹导管属于进化类型,从烟台到新疆茎中网纹导管的宽度和直径呈增大的趋势(宁夏最宽),梯纹导管的长度总体呈增加的趋势,管径先增大后变小(宁夏最大,新疆最小)。导管的长度增加,管径增大减少了水分运输的阻力,提高了水分的运输效率,有助于酸枣在干旱的环境下生存。

木纤维是由管胞经过长度变短、管壁加厚,提高了分子的强度发展而成的^[21]。木纤维管径很小,Carlquist认为,口径窄的导管分子不仅可增加其机械强度,并能维持较高的水张力,能提高管壁对水分得黏着力,增加管内水分内聚力,减少管内产生气泡的危险,防止栓塞化的发生,从而提高植物的抗旱能力^[27]。本研究表明,干旱胁迫下酸枣茎中木纤维的长度缩短,宽度、管径和管壁的厚度逐渐增大,逐渐向短而宽的趋势进化,有助于其提高韧性和机械强度,更有助于植株适应干旱风沙等恶劣环境。

宁夏和新疆酸枣的生长环境严重缺水,为了适应这种环境,茎中导管分子的类型多数是环纹和螺纹形。宁夏酸枣茎中环纹、网纹和梯纹导管宽度最大,螺纹、网纹和梯纹导管长度最长。新疆酸枣茎中网纹导管的管尾最长。在干旱胁迫时,两端具尾导管和一端具尾导管的管径相对较小,导管的管尾使导管分子首尾相连,增大重叠面积和机械强度,能有效增加水分子的内聚力和抗张力能力,这有利于在水分输导过程中形成连续的水柱,保证植物体各部分对水分的需求。由此可见生长在诸如宁夏和新疆等极度干旱的生境中,酸枣茎导管的长导管性、宽导管性和长尾管性,是长期以来对生长环境的适应,极大地提高了输导水分和无机盐的效率,从而来抵抗恶劣的环境,快速补充酸枣在干旱环境中蒸腾散失的水分,保证植株正常生长。

参考文献 (References):

- [1] 康东东, 韩利慧, 马鹏飞, 魏学智, 毕润成. 不同地理环境下酸枣叶的形态解剖特征. 林业科学, 2008, 44(12): 135-140.
- [2] 江涛. 酸枣的护坡性能及种子萌发研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [3] 回瑞华, 侯冬岩, 李铁纯. 酸枣果肉中挥发性化学成分分析. 理化检验-化学分册, 2005, 41(6): 425-427, 430-430.
- [4] He F, Pan Q, Min Z D. A novel lupane triterpene from seeds of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2006, 37(2): 168-171.
- [5] 杨昕, 杨光, 赖玲, 陈宝林. 酸枣仁中白桦脂酸的提取和制备. 中国中药杂志, 2006, 31(5): 437-438.
- [6] Cao J X, Zhang Q Y, Cui S Y, Cui X Y, Zhang J, Zhang Y H, Bai Y J, Zhao Y Y. Hypnotic effect of jujubosides from Semen *Ziziphi Spinosa*. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 130(1): 163-166.
- [7] 赵锦, 刘孟军. 枣树品种、品系及其近缘种的 RAPD 分析. 中国农业科学, 2003, 36(5): 590-594.
- [8] 侯登武, 张芳, 熊泽娥, 张岩. 干旱地区穴播酸枣仁嫁接枣树育苗技术研究. 陕西林业科技, 2008, (4): 45-48.
- [9] 代丽, 刘孟军, 王玖瑞, 周俊义. 酸枣组培快繁研究. 河北农业大学学报, 2005, 28(2): 19-22.
- [10] 贺少轩, 梁宗锁, 蔚丽珍, 周自云. 土壤干旱对 2 个种源野生酸枣幼苗生长和生理特性的影响. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1387-1393.
- [11] 梁静, 魏学智. 酸枣叶对土壤水分的生理生化响应. 植物研究, 2010, 30(5): 549-555.
- [12] 魏学智, 毕润成. 旱生植物酸枣的叶结构. 山西师大学报: 自然科学版, 1997, 11(3): 44-47.
- [13] Quan R D, Shang M, Zhang H, Zhao Y X, Zhang J R. Engineering of enhanced glycine betaine synthesis improves drought tolerance in maize. Plant Biotechnology Journal, 2004, 2(6): 477-486.
- [14] 刘学师, 任永信, 任小林. 酸枣叶片组织结构与抗旱性的研究. 河南职业技术学院学报, 2004, 32(1): 45-47.
- [15] 刘学师. 酸枣叶片水分生理与抗旱性关系的研究. 农业科学, 2012, (12): 43-46.
- [16] 刘学师, 刘新根, 任小林. 酸枣根系抗旱性研究. 河北农业大学学报, 2007, 30(6): 33-37.
- [17] 战立花, 许阿美, 魏学智. 酸枣根系构型和活力对极端干旱气候的响应规律研究. 安徽农业科学, 2012, 40(20): 10435-10438, 10458-10458.
- [18] 鲁松. 干旱胁迫对植物生长及其生理的影响. 江苏林业科技, 2012, 39(4): 51-54.
- [19] Fahn A. 植物解剖学. 天津: 南开大学出版社, 1990: 497-497.
- [20] 刘霞, 彭抒昂, 郭文武. 三种柑橘实生砧木及其两种体细胞杂种根系解剖结构的比较. 园艺学报, 2008, 35(9): 1249-1254.
- [21] 赵云云, 田汝岭. 木质部管状分子的结构及发生. 生物学通报, 1997, 32(3): 8-10.
- [22] Takhtajan A. Morphological Evolution of the Angiosperms. Moscow: Agricultural Press, 1984: 89-93.
- [23] 李吉跃, 翟洪波. 木本植物水力结构与抗旱性. 应用生态学报, 2000, 11(2): 301-305.
- [24] 刘晓燕, 李吉跃, 翟洪波, 朱国彬. 从树木水力结构特征探讨植物耐旱性. 北京林业大学学报, 2003, 25(3): 48-54.
- [25] 房凯. 植物导管输送水的实验室检测方法研究. 绵阳师范学院学报, 2003, 22(2): 56-60.
- [26] 郭学民, 高忠明, 刘振林, 梁丽松, 王贵禧. 美国红栲雄株和雌株茎导管分子的形态解剖比较. 林业科学, 2010, 46(8): 51-55.
- [27] Carlquist S. Wood anatomy of coriariaceae: phylogenetic and ecological implications. Systematic Botany, 1985, 10(2): 174-183.