

DOI: 10.5846/stxb201708271544

朱广龙,陈许兵,郭小倩,焦秀荣,周桂生.酸枣根系结构可塑性对自然梯度干旱生境的适应机制.生态学报,2018,38(16): - .

Zhu G L, Chen X B, Guo X Q, Jiao X R, Zhou G S. Plasticity of root morphology of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in response to natural drought gradient ecotopes. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

酸枣根系结构可塑性对自然梯度干旱生境的适应机制

朱广龙,陈许兵,郭小倩,焦秀荣,周桂生*

单位扬州大学农业科技发展研究院,教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室,扬州 225009

摘要:根系是植物吸收水分和养分的主要器官,是直接接触土壤最先感受土壤逆境胁迫的部位。在干旱环境中,植物根系的结构特征必定发生改变以维持正常的生物机能而生存。目前,关于根系解剖结构的研究大多集中于根系的某一特定结构对单一逆境因子的响应。然而,关于植物根系整体的结构特征对不同生境的适应机制方面的研究较少。为此,文章以生长在烟台-石家庄-银川-吐鲁番不同地域气候条件形成的自然梯度干旱环境中的酸枣为试验材料,应用植物显微技术研究酸枣根系结构的可塑性对不同自然梯度干旱环境的适应机制。结果表明:酸枣根的初生结构包括表皮、皮层和维管柱,表皮位于幼根的最外层,由单层体积较小、紧密排列的表皮细胞组成。皮层占根初生结构的大部分比例,由体积较大的多层薄壁细胞组成,薄壁细胞近似圆球形,数目众多,呈环形分布。维管柱位于最内层,细胞小而密集,由中柱鞘、初生木质部、初生韧皮部及薄壁细胞组成。随生境干旱加剧,酸枣根初生结构表皮细胞的厚度和宽度逐渐增加,皮层薄壁细胞的厚度和宽度、皮层薄壁细胞层数和皮层厚度均以宁夏银川样地的最大。酸枣根的次生结构包括周皮(木栓层、木栓形成层、栓内层)和次生维管组织(次生韧皮部、维管形成层和次生木质部)。从烟台至新疆吐鲁番随生境干旱加剧,酸枣植株根系周皮逐渐加厚、致密度提高。次生木质部中,导管的数量增加,管径增大。干旱环境中,酸枣植株根系结构上的变化一方面提高了吸水能力和输水效率,另一方面增强了保水能力,减少水分散失,这可能是其适应干旱逆境的机制之一。

关键词:酸枣;根系可塑性;梯度干旱;生境;适应机制

Plasticity of root morphology of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in response to natural drought gradient ecotopes

ZHU Guanglong, CHEN Xubing, GUO Xiaoqian, JIAO Xiurong, ZHOU Guisheng*

Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agri-Product Safety, the Ministry of Education of China, Institutes of Agricultural Science and Technology Development, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

Abstract: Water and nutrition are mainly uptaken by the root system, and the root system is directly grown in the soil and is sensitive to stress. In arid environments, the structure of the root system could be changed to maintain normal biology function and adapt to stress conditions. To date, most of the studies have focused on the structure or morphology of root system responses to single stress factors. However, less attention has been concentrated on the adaptive mechanism of the entire root structure to different ecotopes. Therefore, this study explored the root morphological plasticity of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in response to natural drought gradient ecotopes. Root samples were selected from Yantai-Shijiazhuang-Yinchuan-Turpan of China. The four ecotopes formed a natural drought gradient environment according to their soil moisture, annual precipitation, and humidity coefficients. The purpose of this study was to elucidate the mechanism of root plasticity response to different environments caused by climate change. The results showed that root primary structure of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* included the epidermis, cortex, and vascular cylinder. The epidermis is on the surface of the

基金项目:江苏省高校自然科学基金(17KJB210008);扬州大学高层次人才科研启动项目(137011178)

收稿日期:2017-08-27; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzs6653@163.com

young root, which is constituted by a single layer of epidermis cells that are small and arranged closely. The cortex takes the greatest proportion of the primary structure, and it is constituted by a larger quantity of parenchymal cells. The vascular cylinder is located in the innermost layer, and the cells are small and crowded together. It is composed of pericycle, primary xylem, primary phloem, and parenchymal cells. When drought aggravated, the thickness and width of the epidermis cells were increased. In addition, the thickness, width, and number of plies of parenchymal cells, and the thickness of the cortex were all largest at the Yinchuan ecotope. The root secondary structure of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* was divided into periderm (phellem layer, phellogen, phelloderm) and secondary vascular tissue (secondary phloem, vascular cambium, secondary xylem). As the drought intensified from Yantai to Turpan, the thickness and density of periderm was gradually increased. In addition, the diameter and quantity of vessels in secondary xylem were increased. These results illustrated that one of the adaptive mechanisms of plant to drought stress is the changes in the plasticity of root structure that enhance water uptake capacity and water transport efficiency. On the other hand, it improves water retaining capacity and decreases water desorption.

Key Words: *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*; root plasticity; drought gradient; ecotope; adaptive mechanism

干旱是影响植物生长、发育和分布的主要限制因素,在干旱环境中,植物的生理代谢及结构特征必定发生改变,以适应或缓解逆境而得以生存^[1]。根系是植物吸收水分和养分的主要器官,直接接触土壤,是最先感受土壤逆境胁迫的主要部位,也是土壤逆境对植物的危害最主要的部位^[2-3]。在干旱等逆境胁迫下,根系首先感应并发出信号,同时其形态结构、生理化学、生物量等发生相应变化,进而抑制植物生长或做出应激反应^[4]。在长期进化的过程中,植物能够感应外界逆境胁迫,形成了一系列抵御不利环境的机制和策略,如植物体外部形态和细胞结构的改变,生理生化代谢途径的适应等^[2]。有研究表明根系感知与响应胁迫的能力在很大程度上依赖于其对不断变化的土壤环境的适应^[5]。根系解剖结构是根系发育水平的直接体现,与其生理功能密切相关^[6],其木质化程度、输导组织、表皮的附属结构等都会影响植物抵抗逆境的能力^[7]。然而,目前对根系解剖结构适应逆境的研究大多集中在某一解剖组织响应某一特定的胁迫,植物根系整体解剖结构对不同生境的适应机制方面的研究较少。

酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)为鼠李科(Rhamnaceae)枣属(*Ziziphus* Mill.)植物,主要生长于向阳山坡、荒芜丘陵和平原,从湿润的海滨到干旱的荒漠均有分布^[8]。酸枣抗旱耐贫瘠能力强,具有重要的作用,是绿化荒山的先锋树种^[9]。目前,对酸枣的研究主要集中在生物活性物质提取^[10]、药理作用探索^[11]、抗旱生理及耐旱形态特征等方面^[12-14]。研究表明酸枣地上部分器官具有典型的旱生结构,叶片表面有表皮毛分布、气孔下陷、角质层较厚,叶片和茎的结构中晶体和分泌细胞较多,增强了其抗旱性^[8, 15-16]。然而,关于酸枣地下部分根系的解剖结构特征方面的研究较少,关于酸枣根系结构特征对不同梯度干旱生境的适应机制方面的研究尚未见报道。为此,本研究以生长于梯度干旱生境中的酸枣植株为试验材料,探究植物根系结构对不同干旱生境的适应机理,以期了解在全球气候变迁的背景下植物对不同生态环境的适应机制。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

实验材料分别采自烟台莱山区大庄村、石家庄赞皇县北沟村、宁夏银川市贺兰山附近、新疆吐鲁番市红星农场三队。同时采集原生境土样,测定土壤含水量。烟台和石家庄样地土壤类型为棕壤,土壤质地为壤土;银川和吐鲁番样地土壤类型为灰漠土,土壤质地为沙土。样地从东到西(烟台-石家庄-银川-吐鲁番)构成一个自然的梯度干旱环境(各生境土壤含水量、年降水量及湿润系数见表1)。

1.2 采样方法

分别选取上述样地树龄5年(依据芽鳞痕判断树龄)的酸枣植株5株,以植株基茎为中心,半径为0.5 m

的圆形区域垂直向下挖取根样。挖至细根时带土取出,用水冲洗掉泥土,以免破坏根系幼嫩的根尖组织。根系初生结构的研究选取根尖处的幼嫩组织为材料,根系次生结构的研究选取植株主根地面下 10 cm 处的根段为材料。4 个样地中材料的选取部位和截取长度一致。将选取的材料横切成 0.5 cm 长的小段,立即装入 FAA 固定液中保存,带回实验室研究。根系结构的研究采用常规石蜡切片法。具体过程为:将采集的样品固定 24 h 以上,取出经软化剂软化处理 4—5 d(因酸枣根系次生结构硬度大,需软化后方能切片,初生结构无需软化;软化剂配方:甘油 10 mL+浓硝酸 10 mL+蒸馏水 80 mL),全自动组织脱水机(LEICA TP 1020,德国)脱水,二甲苯透明,放入 50 恒温烘箱浸蜡 3—5 d,然后用石蜡包埋机(LEICA EG 1150H,德国)包埋,石蜡切片机(LEICA RM 2265,德国)切片,切片厚度 10 μm 。将切片所得蜡带粘片后经复水、透明,番红-固绿双重对染法染色(全自动染色机 LEICA AUTOSTAINER XL,德国),中性树胶封片,自动盖片机(LEICA CV 5030,德国)盖片后制成永久制片,Nikon E200 光学显微镜下观察照相^[15]。

1.3 统计分析

每个样地随机选取 20 张切片拍照,FSX100 OLYMPS 观察分析图像,根系次生结构各参数采用 Motic Images Plus 2.0 图像分析软件测定,每个样地统计 50 个数据,然后用 SPSS 13.0 统计软件对数据进行 ANOVA 方差分析和最小差异法比较(LSD_{0.05})分析,EXCEL 软件作图,Photoshop 软件图像处理,排版。

2 结果

2.1 酸枣根系初生结构

酸枣根的初生结构包括表皮、皮层和微管柱(图 1A)。表皮位于幼根的最外层,由单层体积较小、紧密排列的细胞组成,称为表皮细胞。表皮细胞为长方形或近似球形,表皮向外突出可形成根毛。表皮的内侧是皮层,占根初生结构的大部分比例,由体积较大的多层薄壁细胞组成,薄壁细胞近似圆球形,数目众多,呈环形分布(图 1A)。微管柱位于最内层,细胞小而密集,由中柱鞘、初生木质部、初生韧皮部及薄壁细胞组成。中柱鞘是微管柱的最外层,有 1—2 层球形细胞组成,细胞壁薄,排列整齐而紧密,呈环形分布。中柱鞘内层为初生木质部和初生韧皮部,细胞小而紧密排列,图中较大的细胞为正在分化的初生木质部,小细胞为初生韧皮部。初生结构发育完成后,初生木质部与初生韧皮部相间分布(图 1B)。

从烟台至新疆吐鲁番样地,酸枣根初生结构表皮细胞的厚度和宽度逐渐增加,依次为 20.65×21.12、22.12×24.06、35.13×34.34、37.40×36.44 μm ,烟台和石家庄根初生结构表皮细胞的宽度大于厚度,呈长方形横向排列;宁夏银川和吐鲁番根系的表皮细胞厚度大于宽度,呈长方形纵向排列(图 1Y、1S,图 2)。皮层薄壁细胞的厚度和宽度变化先增后减(图 3),宁夏银川植株根系的薄壁细胞最大,其厚度和宽度达到 70.49×57.48 μm 。新疆吐鲁番的植株根系的薄壁细胞厚度为 59.89 μm ,小于宁夏银川但高于烟台和石家庄样地的;烟台植株根系的薄壁细胞厚度最小为 42.95 μm (图 3)。根系初生结构的皮层厚度也随干旱加剧而递增,其中以宁夏银川样地的最高为 594.13 μm ,其次是新疆吐鲁番 402.49 μm ,烟台和石家庄的最低,分别为 343.38 μm 和 356.08 μm (图 4A)。

皮层薄壁细胞层数的变化如图 4B,宁夏银川样地的皮层薄壁细胞层数最多为 15 层,其次是烟台样地的 8

表 1 采样地区地理环境及气候特征

Table 1 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±2.3	9±1.4	2±0.8	4±0.9
年降水量 Annual Precipitation/mm	651.9	568	200	15.6
湿润系数 Humidity coefficient	1.65	1.07	0.50	0.04

湿润系数是指一地降水量与蒸发量的对比关系,湿润系数越小,则该地干燥程度越明显。各个样地的湿润系数根据当地气象部门提供的气象资料计算而得。

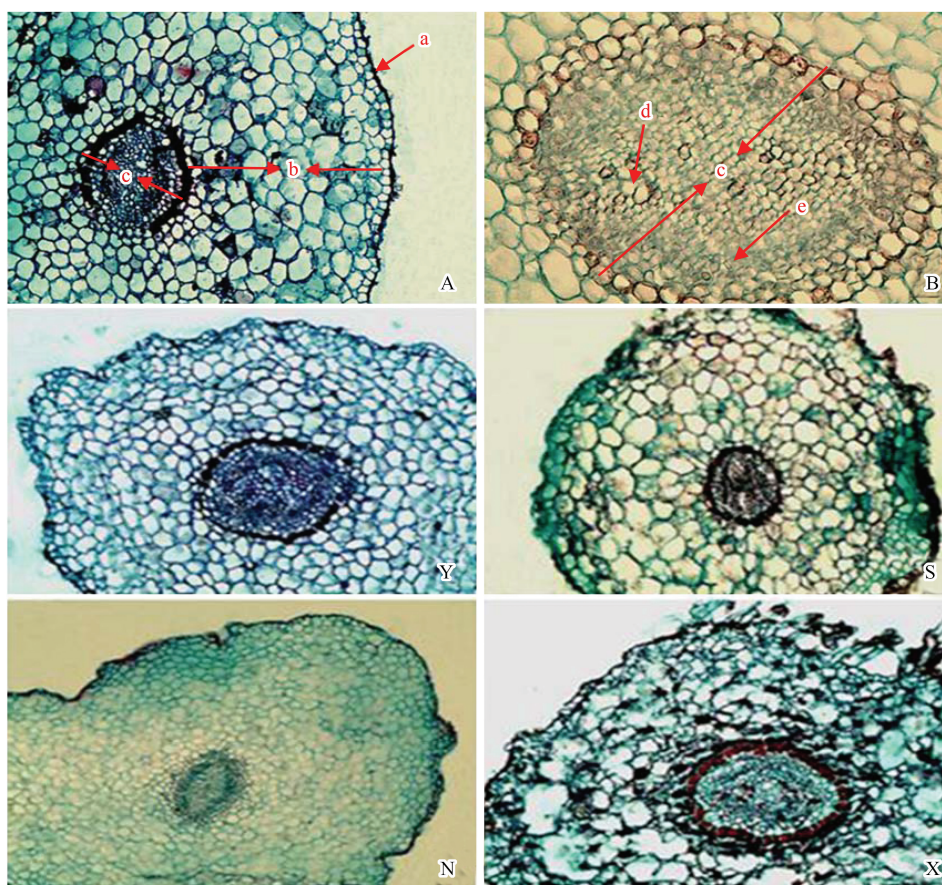


图 1 不同地区酸枣根初生结构

Fig.1 Primary structure of root in *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* in different regions

A: $\times 10$; B: $\times 20$; Y: 烟台, $\times 10$; S: 石家庄, $\times 10$; N: 宁夏银川, $\times 4$; X: 新疆吐鲁番, $\times 20$ 。a: 表皮, b: 皮层, c: 维管柱, d: 初生木质部, e: 初生韧皮部

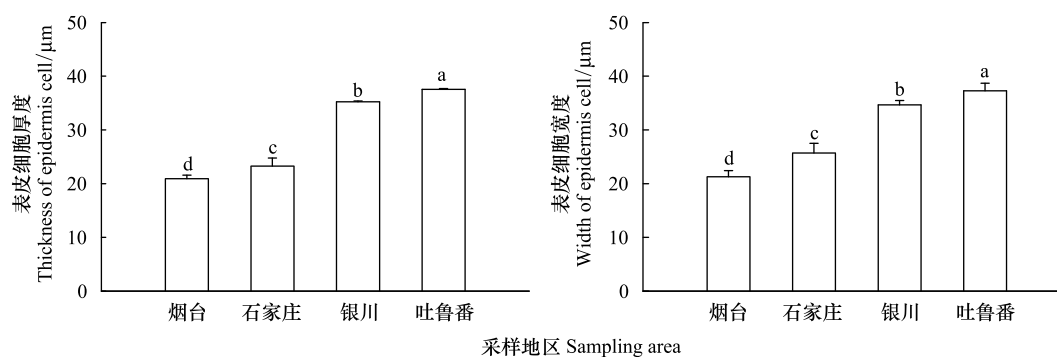


图 2 不同地区酸枣根初生结构表皮细胞厚度和宽度的变化

Fig.2 Changes in thickness and width of epidermis cell in primary structure of root in different regions

层,石家庄 7 层,新疆吐鲁番样地的最少为 6 层排列。中柱鞘细胞的厚度和宽度依次呈增大的趋势(图 5A、5B),新疆吐鲁番样地的厚度和宽度最大为 $26.61 \times 27.93 \mu\text{m}$,烟台样地的最小为 $18.01 \times 17.86 \mu\text{m}$,细胞近似球形排列。维管柱面积以宁夏银川样地的最大,是烟台的 1.20 倍,石家庄的 0.94 倍,新疆吐鲁番的 1.17 倍($P < 0.05$)(图 5C)。

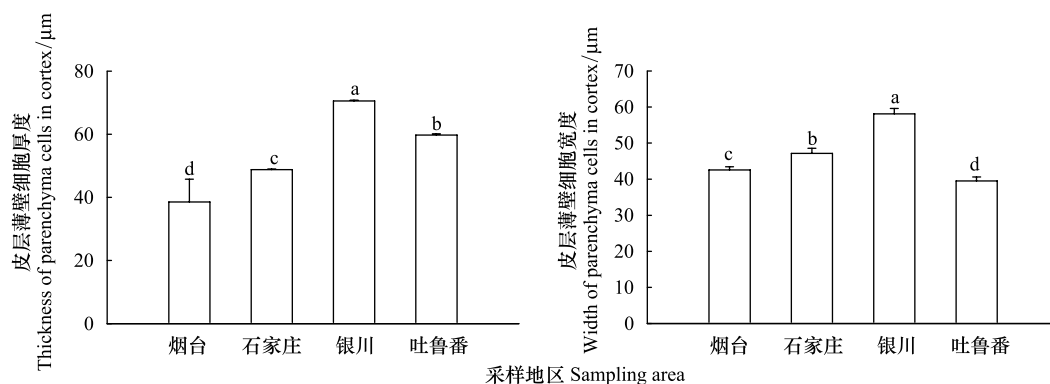


图3 不同地区酸枣根初生结构皮层薄壁细胞厚度和宽度的变化

Fig.3 Changes in thickness and width of parenchyma cell of cortex in primary structure of root in different regions

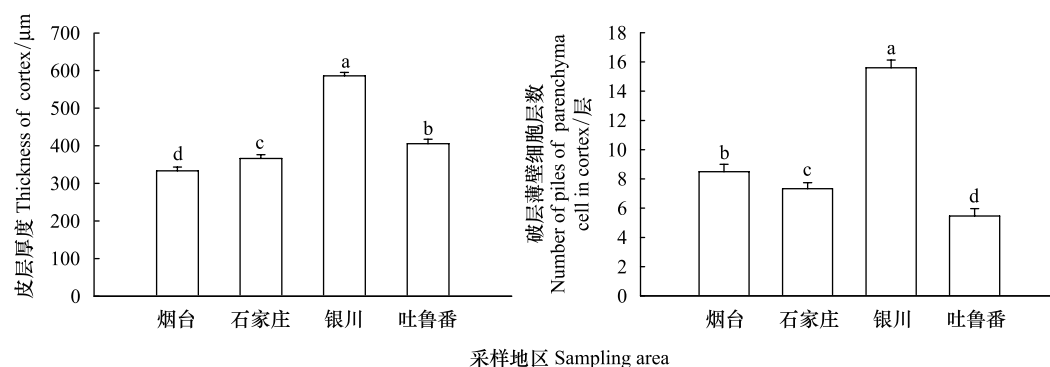


图4 不同地区酸枣根初生结构皮层厚度和皮层薄壁细胞层数变化

Fig.4 Thickness of cortex and number of plies of parenchyma cell in primary structure of root

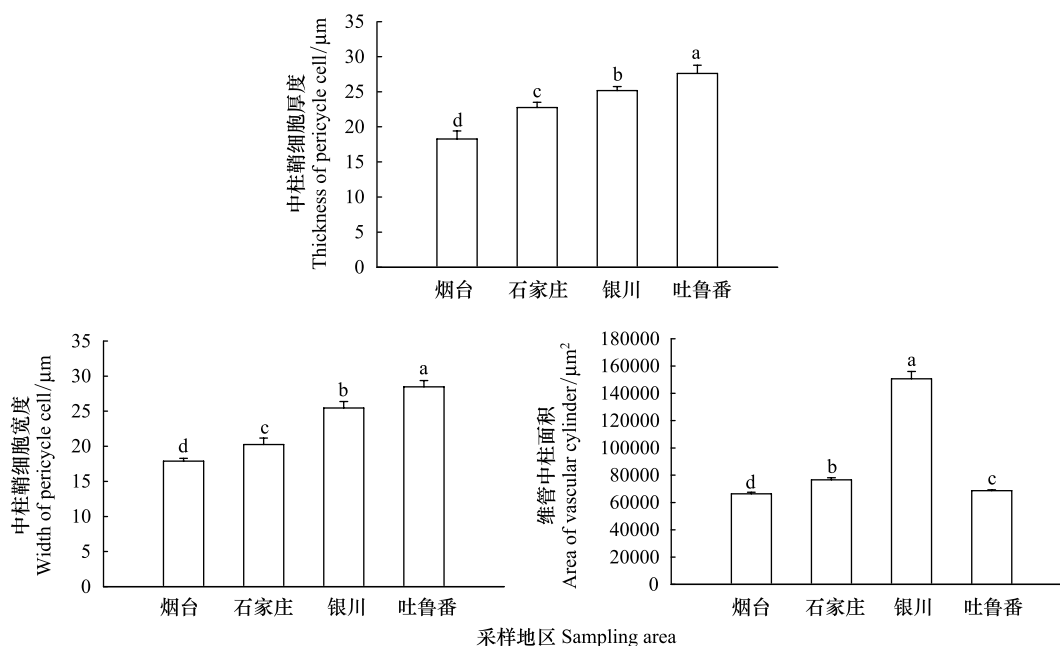


图5 不同地区酸枣初生根中柱鞘细胞厚度和宽度及维管柱面积变化

Fig.5 Changes in thickness and width of pericycle cell and area of vascular cylinder in primary structure of structure of root

2.2 酸枣根系次生结构

酸枣根的次生结构包括周皮(木栓层、木栓形成层、栓内层)和次生维管组织(次生韧皮部、维管形成层和次生木质部)。木栓层位于根的最外层,被染液染成红色,细胞已老化死亡,分布松散,以后脱落(图 6A)。木栓形成层位于木栓层下方,细胞也已不同程度的木质化,细胞狭长扁平,2—3 层排列紧密,呈深紫色(图 6A)。栓内层位于木栓形成层下方,细胞长方形或圆柱形,木质化程度低,着色较浅,细胞轮廓清晰,排列整齐(图 6A)。栓内层下方为次生韧皮部,细胞体积小,细胞壁薄,细胞呈小长方形或圆球形,细胞层数多,紧密整齐的堆叠在一起;包括筛管、伴胞和韧皮薄壁细胞,在次生韧皮部中,夹杂有少量的韧皮纤维,有纵向排列的韧皮射线,起着横向运输的作用(图 6B)。次生韧皮部下为形成层,与次生韧皮部细胞相比,细胞体积较大,3—5 层紧密排列,形成层向外形成韧皮部、向内形成木质部(图 6B)。次生木质部位于形成层的下方,包括导管、管胞、木射线和木薄壁细胞。次生木质部发达,占整个次生结构的 2/3。导管数量多,管径大,管壁厚。导管分布方式多样,有单个分布的,两个分布的及多个导管联合分布的。木薄壁细胞大小一致,纵向垛叠,排列整齐,各导管之间有木射线纵向发出,木射线有体积较小的长方形细胞首尾相连而成;木射线与韧皮射线常是相通的,木射线和韧皮射线合成维管射线(图 6B、6C、6D)。

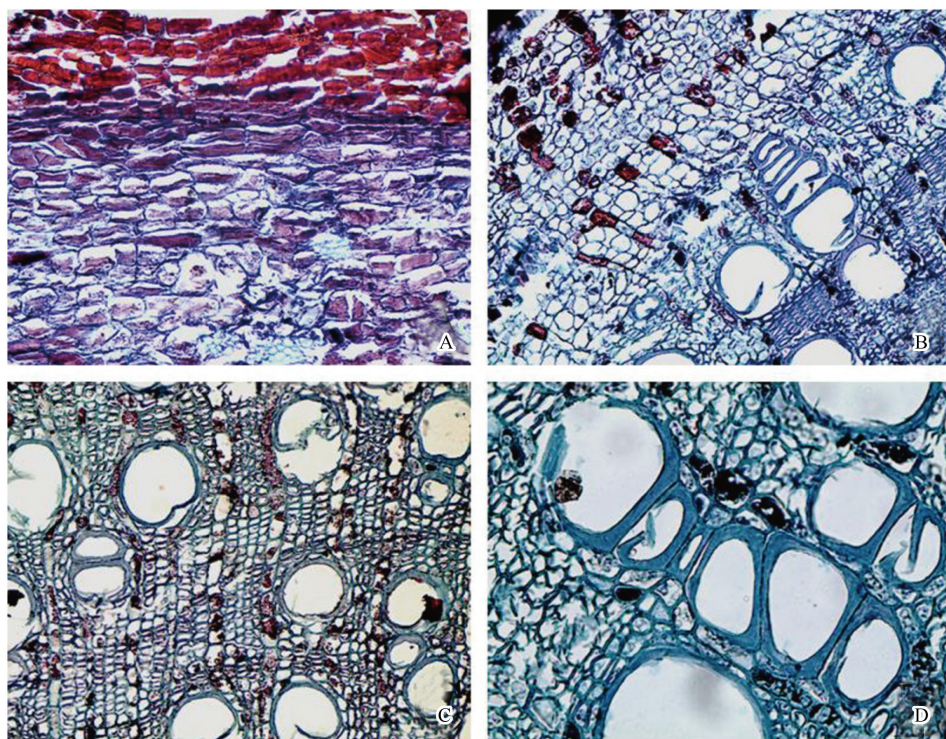


图 6 酸枣根次生结构 A、B、C:×10, D:×20

Fig.6 The secondary structure of in *Zizyphus jujuba* var. *spinosa*

各生境酸枣根的次生结构如图 7 所示,木栓层均已老化即将脱落,染色较深。木栓形成层和栓内层细胞也相继老化,细胞轮廓不清晰,着色较浅(图 7Y1、7S1、7N1、7X1)。木栓层、木栓形成层、栓内层合称周皮,能防御机械损伤,对植物其保护作用。次生韧皮部细胞数目众多,细胞轮廓清晰,排列紧密,形成层明显(图 7Y2、7S2、7N2、7X2)。次生木质部发达,结构清晰,输导系统发达,导管数目众多(图 7Y3、7S3、7N3、7X3)。各导管间有木射线发出,数目多,细胞排列整齐(图 7Y4、7S4、7N4、7X4)。从烟台至新疆吐鲁番随生境干旱加剧,酸枣植株根系周皮逐渐加厚、致密度提高。次生木质部中,单个视野导管的数量增加,新疆吐鲁番样地的最多为 101.6 个,比烟台、石家庄、宁夏银川的分别增加了 73.68%、30.93%和 9.25% ($P < 0.05$) (图 8A)。随干旱加剧,导管的直径也依次增大。4 个样地的平均导管直径分别为 58.64、63.61、69.43 μm 和 72.76 μm 。其中以新疆吐鲁番的最大,分别高于其它地区 24.08%、14.38%和 4.8% ($P < 0.05$) (图 8B),说明在梯度干旱环境

下,酸枣的根部通过分化出更多导管,增加管径来提高水分利用效率,增强对干旱环境的适应性。

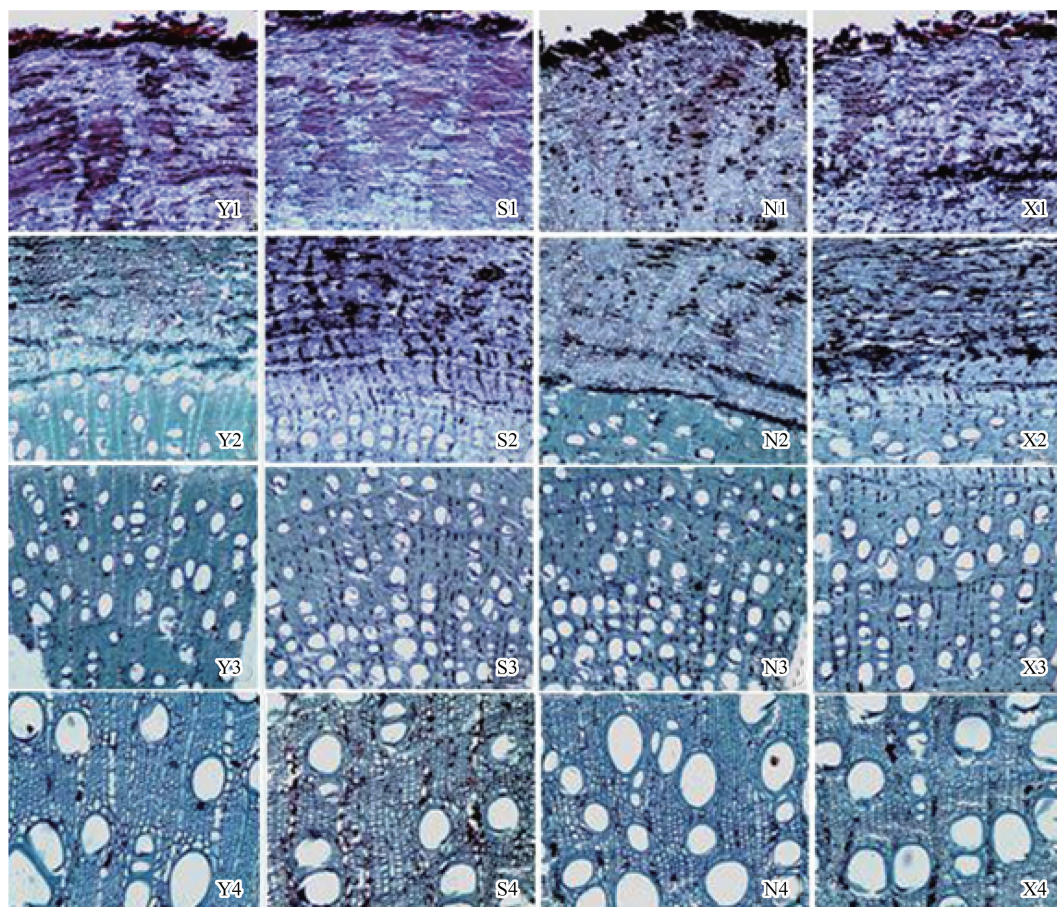


图 7 不同地区酸枣根次生结构

Fig.7 The secondary structure of root in *Zizyphus jujuba* var. *spinosa* in different regions

Y:烟台;S:石家庄;N:宁夏银川;X:新疆吐鲁番。各地区 1、2、3:×10,4:×20

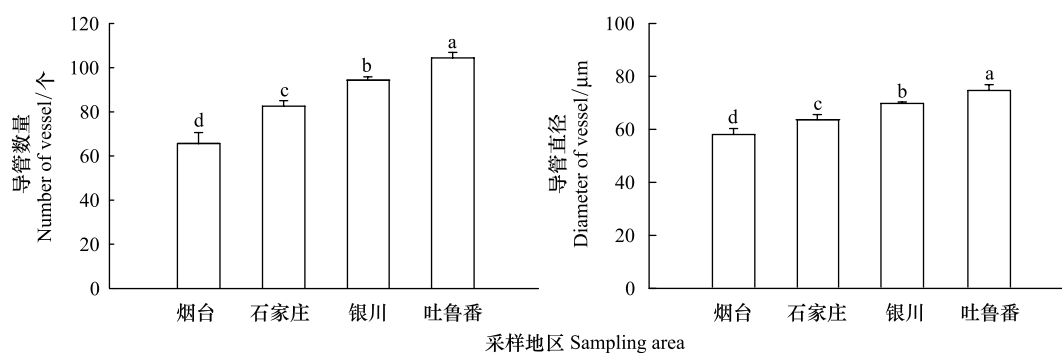


图 8 不同地区酸枣次生根中导管数量和导管直径的变化

Fig.8 Changes in number and diameter of vessel in secondary structure of root

3 讨论

本研究表明,酸枣根初生结构包括表皮、皮层和微管柱。皮层位于表皮的内部,占根初生结构的大部分比例,由大量的薄壁细胞组成,具有光合、呼吸、贮藏及各类代谢物的合成和转化功能。从烟台至新疆吐鲁番随梯度干旱增加,酸枣根初生结构表皮细胞的厚度和宽度逐渐增大。烟台和石家庄根初生结构表皮细胞宽度大

于厚度,呈长方形横向排列;宁夏银川和新疆吐鲁番的表皮细胞厚度大于宽度,呈长方形纵向排列。这些表皮细胞排列方式的变化,增加了其厚度和致密性。尤其在宁夏银川和新疆吐鲁番的沙质生境中,较厚的表皮细胞有利于根的伸展。皮层细胞的厚度、宽度增大,层数增多,细胞中储藏大量的营养物质。微管柱包括中柱鞘和初生维管组织,微管柱的面积能反应初生木质部和初生韧皮部的发育程度。在梯度干旱生境中,微管柱的面积依次增大,以宁夏银川的最大。这与其土壤含水量有关,宁夏地区的土壤含水量是四个生境中最低的。在极度干旱的土壤环境中,植株根系以加强输导系统的分化,提高对水分的吸收与传输效率。

酸枣根的次生结构包括周皮和次生维管组织,次生木质部发达,占整个次生结构的 2/3。从烟台至新疆吐鲁番,次生木质部中导管数量逐渐增多,管径依次增大。这种输导系统的变化有利于提高输水效率,增强抗旱性。有研究表明,水分胁迫时,达乌里胡枝子的导管比正常供水发达,其导管直径变大对水分的输导更有利,增强了抵抗水分的能力^[17],这与本研究的结果一致。干旱条件下酸枣根部周皮和次生维管组织发达,周皮的木栓层具有保护作用,根皮层层数减少,缩短了水分吸收的距离^[18];木质部发达,输导组织所占比例有增大趋势,能更有效地输送水分,韧皮部的薄壁组织细胞的细胞壁强烈木质化可进一步保证输导的安全性^[19]。此外周皮的存在既能防止高温对根的灼伤及根部向土壤反渗透失水,又可防止冬季严寒对根的冻伤^[20]。同时可对土壤中的有害物质进行选择隔离,阻止其进入根中,保证了植物体生理代谢的正常进行^[21]。维管束是根系内主要的输导组织,是连接根系与地上部分的通道,维管束直径的变化可明显反映出根系内输导组织(导管和筛管)的发育状况^[22]。

有研究证实,诸如酸枣植株这类根部维管组织发达、韧皮部外侧由数层薄壁细胞组成且胞间隙发达的结构,可使根的渗透吸水能力进一步提高;另一方面部分表皮细胞突起可形成根毛,使根的吸收面积增大^[20]。木质部占有较大的比例,导管分子数量多、口径大,根的这种结构特点有利于对水分的吸收和横向、纵向运输,增强了酸枣植株的抗旱能力^[23]。有研究表明,在干旱加剧的条件下,小叶章根中导管的数量增加、管腔增大,维管柱厚度增加,这与本研究的结果一致,这种结构的变化有利于提高输水效率,增强根的输导功能,有利于适应干旱环境^[24]。旱生植物狭叶柴胡的根系结构在干旱逆境中也表现出相似的变化^[25],其根次生结构中周皮发达,能保护根部抵御干旱环境;导管管径增大、数量增多有利于水分的运输,从而提高了植株的抗旱能力^[26]。

在逆境条件下,植物体内的水分和盐分变化直接影响根系的细胞结构,并严重影响植物对水分和营养物质的吸收,最终表现在植物的表型上^[27]。植物体内的水分状况和水分代谢直接受土壤环境和气候的影响。在取样调查中,我们发现随梯度干旱加剧,酸枣植株节间缩短、植株矮小、叶面积减小^[8,15]。植物在生长过程中地上部与地下部具有协调效应,即地上部生长旺盛则地下部生长受抑,地上部生长受抑则地下部生长过快。在梯度干旱生境中,宁夏银川和新疆吐鲁番生境的酸枣植株地上部分生长减缓,而地下部根系较发达,其纵深扎根深度可达数米,以吸取土壤深层水分而维持生命。因此,在干旱逆境中,酸枣植物除了根系结构的可塑性改变外,地上部与地下部的相互协调生长也是其适应极端干旱逆境的策略之一。

参考文献 (References):

- [1] 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): 8268-8275.
- [2] 弋良朋, 马健, 李彦. 盐胁迫对 3 种荒漠盐生植物苗期根系特征及活力的影响. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, 36(S2): 86-94.
- [3] Schiefelbein J W, Benfey P N. The development of plant roots: new approaches to underground problems. The Plant Cell, 1991, 3(11): 1147-1154.
- [4] Merchan F, de Lorenzo L, Rizzo S G, Niebel A, Manyani H, Frugier F, Sousa C, Crespi M. Identification of regulatory pathways involved in the reacquisition of root growth after salt stress in *Medicago truncatula*. The Plant Journal, 2007, 51(1): 1-17.
- [5] Hodge A, Berta G, Doussan C, Merchan F, Crespi M. Plant root growth, architecture and function. Plant & Soil, 2009, 321(1/2): 153-187.
- [6] Macfall J S, Johnson G A, Kramer P J. Comparative water uptake by roots of different ages in seedlings of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). New Phytologist, 1991, 119(4): 551-560.
- [7] Nobel P S. Physicochemical and Environmental Plant Physiology. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2009.

- [8] 朱广龙, 邓荣华, 魏学智. 酸枣叶表皮微形态对不同生态环境的适应特征. 生态学报, 2016, 36(16): 5193-5203.
- [9] 王慧莉, 田涛, 王建永, Batool A, 赵旭喆, 莫非, Akram N A, 熊友才. 旱区农业雨水资源利用与生态系统可持续性: 2013 干旱农业和生态系统可持续性国际会议综述. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3127-3136.
- [10] 蔡雨晴, 贾棹东, 吴茜茜, 白红进, 蒋卉. 响应面法优化野生酸枣仁中总黄酮的提取工艺. 中国饲料, 2016, (3): 23-27.
- [11] 耿欣, 李廷利. 酸枣仁主要化学成分及药理作用研究进展. 中医药学报, 2016, 44(5): 84-86.
- [12] 吕新民, 杨怡帆, 鲁晓燕, 靳娟, 樊新民. NaCl 胁迫对酸枣幼苗 AsA-GSH 循环的影响. 植物生理学报, 2016, 52(5): 736-744.
- [13] 邓荣华, 高瑞如, 刘后鑫, 赵亚锦, 朱广龙, 魏学智. 自然干旱梯度下的酸枣表型变异. 生态学报, 2016, 36(10): 2954-2961.
- [14] 王改利, 魏忠, 贺少轩, 周雪洁, 梁宗锁. 土壤干旱胁迫对酸枣叶片黄酮类代谢及某些生长和生理指标的影响. 植物资源与环境学报, 2011, 20(3): 1-8.
- [15] 朱广龙, 魏学智. 酸枣叶片结构可塑性对自然梯度干旱生境的适应特征. 生态学报, 2016, 36(19): 6178-6187.
- [16] 朱广龙, 马茵, 韩蕾, 霍张丽, 魏学智. 植物晶体的形态结构、生物功能及形成机制研究进展. 生态学报, 2014, 34(22): 6429-6439.
- [17] 赵祥, 董宽虎, 张垚, 朱慧森, 杨武德, 杨美红. 达乌里胡枝子根解剖结构与其抗旱性的关系. 草地学报, 2011, 19(1): 13-19.
- [18] 李正理, 李荣敖. 我国甘肃九种旱生植物同化枝的解剖观察. 植物生态学报(英文版), 1981, (3): 15-19.
- [19] 黄振英, 吴鸿, 胡正海. 30 种新疆沙生植物的结构及其对沙漠环境的适应. 植物生态学报, 1997, 21(6): 521-530.
- [20] 白重炎, 周迪. 雀儿舌头根、茎、叶的解剖结构研究. 安徽农业科学, 2011, 39(6): 3336-3338, 3379-3379.
- [21] 周智斌, 李培军. 我国旱生植物的形态解剖学研究. 干旱区研究, 2002, 19(2): 35-40.
- [22] 刘穆. 种子植物形态解剖学导论(第五版). 北京: 科学出版社, 2010.
- [23] 陈亚宁, 杨思全. 自然灾害的灰色关联灾情评估模型及应用研究. 地理科学进展, 1999, 18(2): 158-162.
- [24] 张艳馥, 沙伟, 王晓琦, 杨柳, 倪红伟. 三江平原不同生境条件下小叶章根解剖结构的研究. 中国草地学报, 2006, 28(5): 110-112, 117-117.
- [25] 张义玲, 冯成强, 孟繁蕴, 张文生. 药用柴胡属植物产地与化学成分相关性研究. 生命科学研究 专辑, 2006, 10(4): 86-89.
- [26] 郑丽, 蔡霞, 胡正海. 狭叶柴胡根的发育解剖学研究. 植物研究, 2009, 29(6): 659-664.
- [27] 张瑞群, 马晓东, 吕豪豪. 多枝怪柳幼苗生长及其根系解剖结构对水盐胁迫的响应. 草业科学, 2016, 33(6): 1164-1173.