

DOI: 10.5846/stxb201408261696

朱广龙, 邓荣华, 魏学智. 酸枣根系空间分布特征对自然干旱梯度生境的适应. 生态学报, 2016, 36(6): - - .

Zhu G L, Deng R H, Wei X Z. Spatial distribution of the root system of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in response to a natural drought gradient ecotope. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - - .

酸枣根系空间分布特征对自然干旱梯度生境的适应

朱广龙, 邓荣华, 魏学智*

山西师范大学生命科学学院, 临汾 041000

摘要:以烟台、石家庄、银川和吐鲁番四个地区自然干旱梯度条件下生长的酸枣植株为试验材料,对酸枣根系的次生木质部导管及不同径级根系的分布特征进行研究。结果表明:从烟台到吐鲁番,酸枣根次生木质部中导管数量逐渐增多,管径依次增大。酸枣细根($d \leq 2$ mm)长度远远大于其它径级根系的长度。随着干旱程度的增加,垂直方向上,细根出现在较深的土层,水平方向上,酸枣根幅扩大到 560 cm,在末端或者接近末端的地方出现较多的细根分支。随着干旱程度的增加,5 mm < d < 10 mm 的根系长度在总根长中所占的比例逐渐增大,其可能为干旱生境中植株根系获取水分和养分的主要部位。不同生境中酸枣根系空间分布特征的变化是其长期生存于梯度干旱环境的适应特征。

关键词:酸枣;根系;导管;空间分布;抗旱性

Spatial distribution of the root system of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* in response to a natural drought gradient ecotope

ZHU Guanglong, DENG Ronghua, WEI Xuezhong*

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

Abstract: Plants utilize different mechanisms to cope with drought stress; namely, drought escape, drought tolerance, drought recovery, and drought avoidance. Roots are plants' primary means of nutrient and water uptake, and also play a vital role in soil preservation while anchoring plants in place. Recently, extreme climate events such as heat waves and droughts are occurring more frequently due to global warming. Water limited conditions (also referred to as droughts) are characterized by soil moisture availability insufficient to support average plant growth and production. Under such conditions, plants must alter their root morphology in order to absorb more water and nutrients. When studying the morphological structure and distribution of root systems, it is helpful to understand the stress-resistance mechanism. Thus, the present study investigated the spatial distribution and secondary structure of the roots of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*, which is distributed across Yantai, Shijiazhuang, Yinchuan, and Turpan, which create a natural drought gradient because of their differences in soil moisture, annual precipitation, and humidity coefficients. The results showed that the quantity of vessels in the secondary structures of roots increased and vessel diameter also increased as drought conditions worsened along the gradient from Yantai to Turpan. In addition, *Ziziphus jujuba* Mill. Possessed the longest of rootlets ($d \leq 2$ mm). With increased drought stress, the proportion of fine roots distributed in the deeper soil layers gradually increased. In the horizontal direction, the root could grow to 560 cm, and a large number of rootlets grew from the end of the taproot. As drought stress increased, roots 5 mm < d < 10 mm in length made up a large proportion of the total root length. This illustrates that most of water and nutrition was acquired from this section when plants were exposed to a drought ecotope. The

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:2014-08-26; 网络出版日期:2015- -

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

difference in root system distribution *Ziziphus jujube* Mill. in different ecotypes is an adaptive trait.

Key Words: *Ziziphus jujube* var. *spinosa*; root system; vessel; spatial distribution; drought resistance

干旱是影响作物生长发育和分布的重要因素之一。植物长期处于干旱环境中逐步发展形成了适应逆境的形态结构以及生态适应性^[1-2]。根系是连接植物地上部分与土壤的枢纽,根系的空间分布特征是一个重要的耐旱性指标。在干旱胁迫下植物通过调整根的生长或者分布特征来提高对土壤水分的吸收能力,以维持体内水分的平衡^[3]。例如,土壤水分状况的差异会影响刺槐根系的分布特征^[4];黄柳(*Salix gordejewii*)粗根的分布与土壤水分呈显著相关性^[5];细根的垂直分布与树木耐旱性有关,干旱胁迫能够增加深土层细根的比例^[6]等。同一种植物长期生长在不同异质环境条件下(温度、光照、水分和盐分等),通过适度调整形态特征,逐渐形成对自身有利的表型性状,从而增强其对局地环境的适应能力^[7],以此来维持种群的生存和更新。

酸枣(*Ziziphus jujube* var. *spinosa*)为鼠李科(Rhamnaceae)枣属(*Zizyphus* Mill.)灌木或小乔木,分布于我国北方诸省。酸枣的根系分布纵向深且横向广,抗寒、抗旱及抗贫瘠能力强,从中国湿润的东部海滨到极度干旱的西北内陆均能良好生长^[8]。有关酸枣的研究主要集中在化学成分的提取^[9-12]、药理作用的探索^[13-14]、系统分类学^[15]、组培嫁接^[16-17]、结构特征和抗逆性^[8,18-19]等方面。康东东^[8]、梁静^[19]等分别研究了不同生境下的酸枣叶片结构以及其对于干旱的生理响应;尹惠敏^[20]、战立花^[21]等分别对酸枣根系构型以及其对极端干旱气候的响应规律进行了研究。尽管有关酸枣耐旱的叶片结构及根系构型有研究报导,在很大程度上解释了该植物对于干旱的适应性,但这些研究多集中于局地,未能解释酸枣根系在大尺度上如何适应梯度干旱环境的变化,且关于酸枣根系导管对不同梯度干旱生境适应特征方面的研究较少。为此我们拟以分布于烟台、石家庄、银川、吐鲁番自然干旱梯度环境中生长的酸枣为试材:(1)对根中次生木质导管随干旱梯度的变化规律和(2)不同径级根系的空间分布特征对自然干旱梯度的响应进行研究,进而(3)预测酸枣植株根系特征对未来气候变化的响应,以期阐明酸枣根系对自然干旱梯度的适应机制,从而丰富酸枣适应环境变化的生活史对策理论,同时预测气候变化条件下,酸枣植株的地下部分形态和结构对极端干旱气候响应的演变趋势及未来的种群动态。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2010年7月,分别选取山东烟台(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)4个天然居群。每个居群随机取5株,树龄5年(依据芽鳞痕判断),生长正常,未发现病虫害的酸枣植株,植株间的距离不小于5 m,以保证取样的均匀性,最大限度降低母树间的亲缘关系。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,该样地土壤类型为壤土,优势种为酸枣,伴有多数生的荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、金银花(*Lonicera japonica*)、萱草(*Heimerocallis citrina*)、茜草(*Rubia cordifolia*),以及一年生的草本植物鸭跖草(*Commelina communis*)、扁蓄(*Polygonum aviculare*)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)等植物。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,样地土壤为壤土,优势种为酸枣,伴有多数生的芦苇(*Phragmites australis*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、小蓟(*Cirsium setosum*)、艾草(*Artemisia argyi*),以及一年生的草本植物鬼针草(*Bidens pilosa*)、小蓬草(*Conyza canadensis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis* Beauv)等植物。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,样地土壤为沙土,优势种为酸枣,伴有多数生的小蓟(*Cirsium setosum*)、鹅观草(*Roegneria kamoji*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、野葱(*Allium fistulosum*),以及一年生的草本植物猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis* Beauv)等植物。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,样地土壤为壤土,优势种为酸枣,伴有多年生的打碗花(*Calystegia hederacea*)、苜蓿(*Medicago sativa*),以及一年生的草本植物猪毛菜(*Salsola collina*)、小藜(*Chenopodium serotinum*)等植物。采样地从东到西(烟台—石家庄—银川—吐鲁番),构成一个自然的梯度干旱环境(其土壤含水量、年降水量及湿润系数见表 1)。

表 1 采样地区地理环境及气候特征

Table 1 The geographical trait and climatic characteristics of sampled areas

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

1.2 试验方法

1.2.1 酸枣根的次生结构

分别选取 4 个采样地 5 年生酸枣植株根的次生木质部结构(因酸枣根系深广,在导管研究取样中特选取具有代表性的次生结构:主根地面下 10 cm 处;因工作量太大并未分段取样研究),横切成 0.5 cm 长的小段,立即装入 FAA 固定液中保存,每个样地选取 5 株做为重复。采用常规石蜡切片法。具体过程为:取样→固定→软化(甘油 10 mL+浓硝酸 10 mL+蒸馏水 80 mL,处理 4—5 d)→脱水→透明、浸蜡→包埋→切片(切片厚度为 10 μm)、贴片、烘干→染色(番红-固绿对染)→中性树胶封片后制成永久制片,Nikon E200 光学显微镜下观察照相^[22]。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(每张图片中有多个导管),然后用 SPSS13.0 统计软件对数据进行统计分析,SigmaPlot 10.0 软件作图,Photoshop 软件图像处理,排版。

1.2.2 酸枣根系空间分布特征

由于酸枣根系较大,分布深广,整体取样较为困难,因此根系采集采用分层分段挖掘法,每个样地做 5 次重复。将其根系以树干为中心,按其在各个方向上分布具的对称性,垂直方向由地表向下每 20 cm 为一层,水平方向上每 20 cm 设为一段,然后分层分段挖掘根样,直到没有根系出现为止,将各层各段的酸枣根编号装入自封袋带回。将根样洗净、擦干,用 EPSON PERFECTION V700 PHOTO 扫描仪、WinRHIZO (Version 4.0B, Regent Instruments Inc, Canada)根系分析系统扫描、分析。此次研究按:细根 $d \leq 2 \text{ mm}$,小根 $2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$,中根 $5 \text{ mm} < d \leq 10 \text{ mm}$,大根 $d > 10 \text{ mm}$ 划分方式^[23-24],对酸枣根系进行分级。所有数据均用 SPSS 13.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)统计软件进行分析,Systat Sigmaplot 12.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 四个采样地酸枣根中次生木质部导管的数量及管径的变化趋势

从烟台到吐鲁番,根次生木质部中,单位面积导管的数量依次增加(图 1),烟台、石家庄、宁夏、吐鲁番的平均值分别为 58.5 个、77.6 个、93 个、101.6 个。吐鲁番比烟台、石家庄、宁夏的导管数量分别多了 73.68%、30.93%、9.25% ($P < 0.05$) (图 2B)。导管的直径也依次增大,烟台、石家庄、宁夏、吐鲁番管径分别为 58.64 μm 、63.61 μm 、69.43 μm 、72.76 μm ,以吐鲁番的最大,分别高于其它地区 24.08%、14.38%、4.8% ($P < 0.05$) (图 2A)。

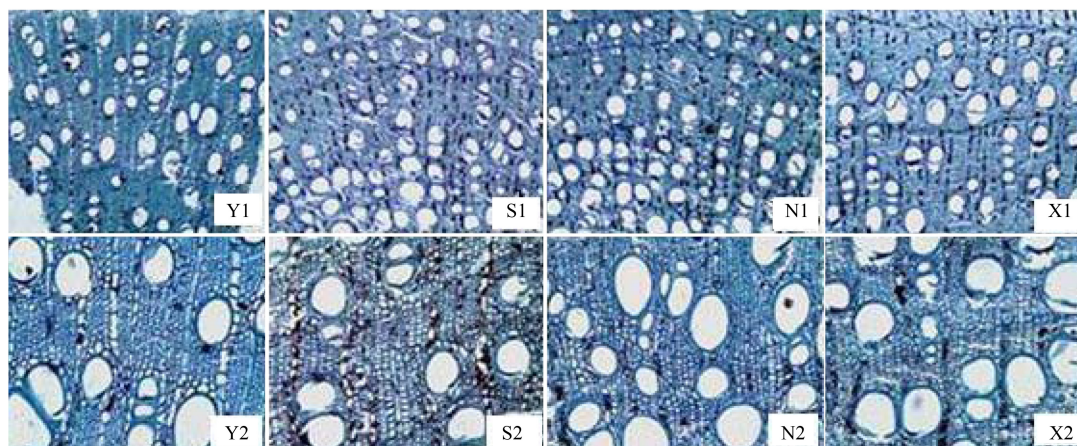


图 1 不同地区酸枣根次生结构

Fig. 1 The secondary structure of root in *Zizyphus jujuba* Mill. in different ecopote

Y: 烟台; S: 石家庄; N: 宁夏; X: 新疆。各地区 1: ×10, 2: ×20。

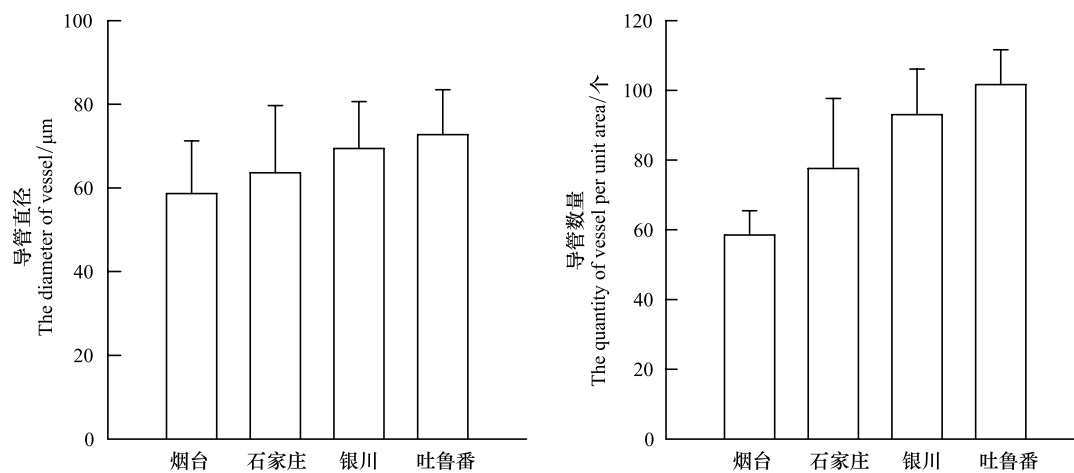


图 2 不同地区酸枣次生根中导管直径和单位面积导管数量的变化 (A: 导管直径, B: 单个面积导管数量)

Fig. 2 The diameter and quantity of vessel in secondary structure of root in *Zizyphus jujuba* Mill. in different regions

(A, B represent the vessel diameter and the quantity of vessel per area)

2.2 酸枣不同径级根系的分布特征

2.2.1 垂直方向的分布特征

从 4 个样地各级根系长度分布图可以看出, 细根长度远远大于其他三级根系的长度, 烟台 (图 3A)、石家庄 (图 3B)、银川 (图 3C)、吐鲁番 (图 3D) 酸枣的细根长度分别占各自总根系长度的 74.13%、73.47%、64.26%、56.81%。烟台和石家庄酸枣的细根主要分布在 0—40 cm 的土层中, 20—40 cm 土层中的细根长度分别占各自酸枣细根总长度的 26.63% 和 37.61%; 银川和吐鲁番地区酸枣细根主要分布在 0—60 cm 土层中, 20—60 cm 土层中的细根长度分别占各自总量的 57.66% 和 44.57%。

具有一定吸收能力的 2 mm < d < 5 mm 根系在样地中的分布也表现出一定的差异性, 烟台、石家庄、银川和吐鲁番酸枣中该级根系分别占各自总根系长度的 16.53%、14.76%、19.96%、25.70%。而 5 mm < d < 10 mm 的根系所占总根长的比例随着干旱程度的增加呈明显上升趋势, 分别为: 6.60%、8.06%、11.16%、15.42%。d > 10 mm 的根系在总根系长度中所占比例很小, 在四个样地中的分布总体上也是随着降雨量的减少而增大, 而吐鲁番地区表现出例外。

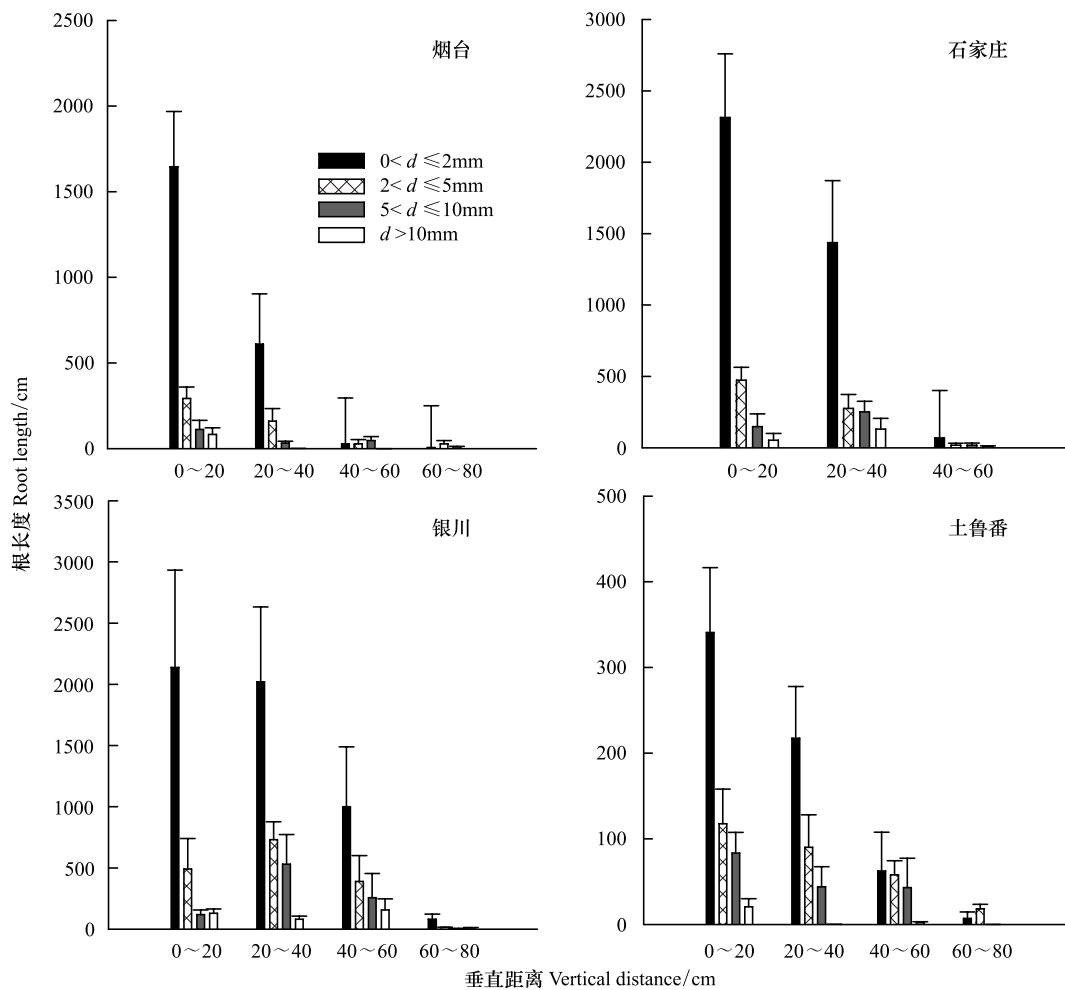


图 3 四个样地酸枣不同径级根系在垂直方向的分布特征

Fig. 3 The vertical distribution characteristics of *Zizyphus jujube* Mill. root system in four sampling area

A, B, C 和 D 分别代表烟台、石家庄、银川和吐鲁番

2.2.2 水平方向的分布特征

四个样地中酸枣根系在水平方向的分布差异显著,烟台(图 4A)和石家庄(图 4B)酸枣的根幅相近分布在 180—200 cm 之内,而干旱地区的银川酸枣(图 4C)根系在水平方向分布可达 560 cm,吐鲁番地区(图 4D)酸枣根系横向分布最小,约为 140 cm。

烟台地区酸枣根系 $d \leq 2$ mm 的细根和 $d > 10$ mm 的粗根水平方向主要分布在半径 40 cm 的范围内,分别占各自总量的 57.17%、71.81%。 $2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ 的根系随着水平距离的增大而呈不显著的降低趋势,接近末梢细根表现出突然增大的现象。石家庄地区 $d > 10$ mm 的根系水平方向上主要分布在 0—40 cm 的范围内,占其总量的 63.97%,其它三级根系长度整体上随着水平距离的增大而逐渐减小。银川根系水平方向主要分布在 0—120 cm 范围内, $0 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ 、 $d > 10 \text{ mm}$ 根系长度分别占各自总量的 92.57%、85.76%、63.99%,此范围内 $5 \text{ mm} < d \leq 10 \text{ mm}$ 的根系长度占其总量的 48.94%。吐鲁番地区 $d > 10$ mm 的根系主要分布在 0—20 cm 范围内,约占总量的 83.44%,其他三级根系长度主要分布在 0—80 cm 的范围内,分别占各自总量的 85.67%、78.88%、85.04%, $0 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ 根系均表现出末端增大的现象。

3 结论与讨论

3.1 酸枣根的次生木质部导管对干旱梯度的响应

根系是植物与土壤联系的枢纽,直接影响着整个植株的生长和发育^[25]。研究根的结构能够了解根系的

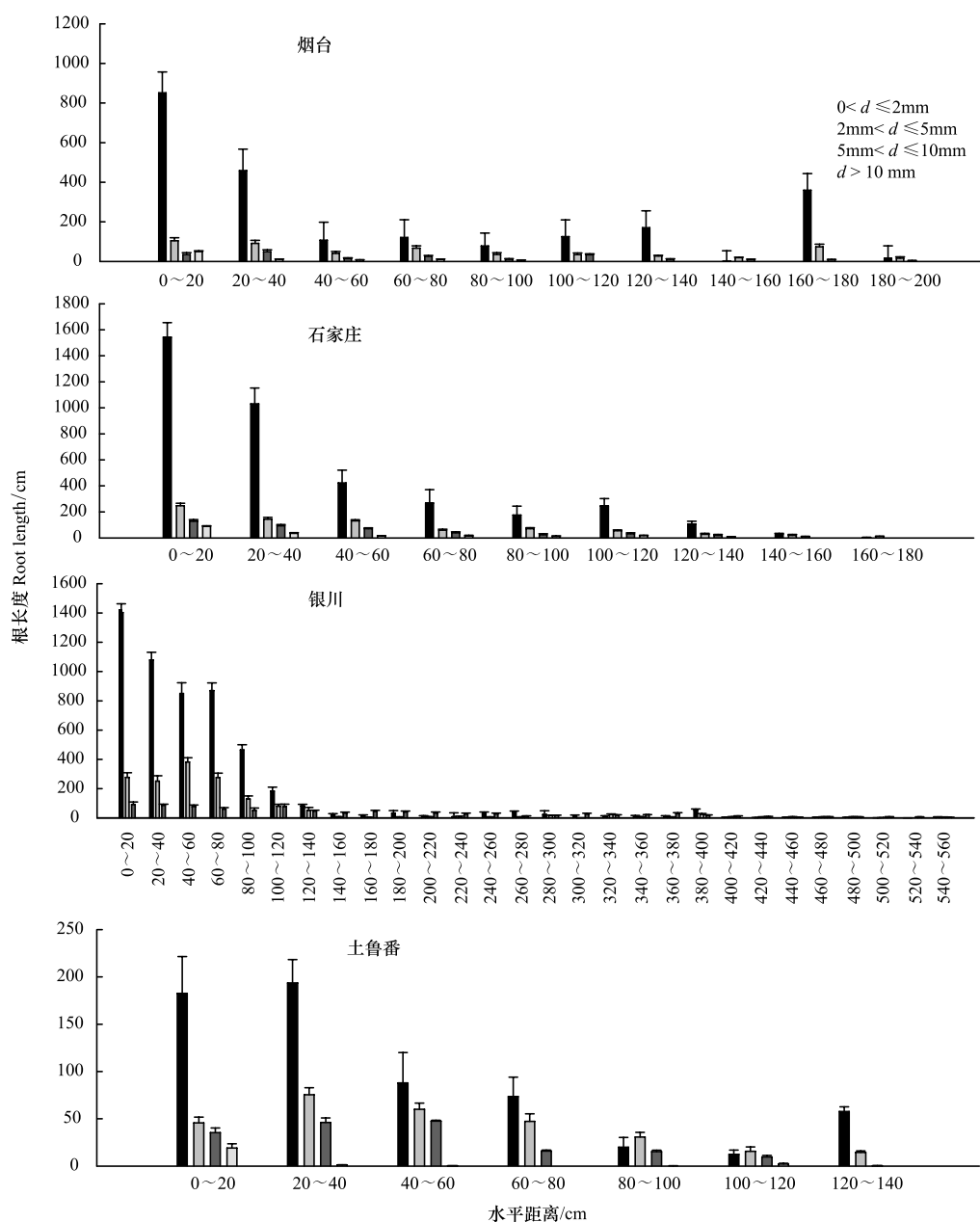


图 4 四个样地中酸枣根系水平分布特征

Fig. 4 The horizontal distribution characteristics of *Zizyphus jujube* Mill. root system in 4 sampling area

发育水平及生理功能^[26]。同种植物长期生长在不同程度的干旱环境中,内部结构会随环境的不同而发生改变,抗旱性强的植物表现出根中比较发达的木质部导管,输导组织所占比例有增大趋势,提高了水分的运输效率^[27]。烟台和石家庄土壤含水量高,年降水量充沛,酸枣根系中导管数量较少,即可获取足够水分满足植株正常生长。然而宁夏和新疆的土壤含水量和降雨量仅为烟台和石家庄的 1/3 至 1/4,极度干旱环境中如何获取水分是植株生存的关键,酸枣植株通过增加根系导管数量以提高水分获取效率。从湿润的烟台到极端干旱的吐鲁番,次生木质部中单个面积导管数量逐渐增多,管径依次增大,输水效率提高。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。可见其导管数量的增多和管径的增大,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。

3.2 酸枣不同径级根系空间分布特征对干旱梯度的响应

根系分布的深度和广度影响植物对水分和营养物质的吸收,与植物的抗旱能力密切相关^[28]。刘学师^[18]等人研究结果表明酸枣以其深或广的根系来增强其抗旱性能,且根系越发达,分布越深、越广抗旱性越强。本实验 4 个采样地中,细根长度远远大于其他三级根系的长度,垂直方向上,随着降雨量的减少土壤干旱程度的增强,酸枣根系在较深土层中的分布比例也越来越大;水平方向上,酸枣根幅在四个样地中分布差异显著,在降雨量少的银川地区,庞大的根系有利于植物吸收充足的水分来满足植物的生长和生存需求,这与梭梭、骆驼刺、黄柳^[5,27]等旱生植物根系抗旱特性相似。

植物中的粗根($d > 2 \text{ mm}$)主要起运输、储藏和支撑作用^[29]。研究发现,酸枣 $2 \text{ mm} < d < 5 \text{ mm}$ 的根系主要分布在 20—40 cm 土层,除了银川地区,其它 3 个样地该径级根系随着土层的加深呈逐渐减少的趋势,水平方向上的分布无明显规律,还有待进一步研究。 $5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm}$ 的根系长度在总根长中所占的比例随着干旱程度的增加而逐渐增加,析其原因可能是从烟台到新疆,酸枣的生长环境越来越恶劣,其根系需发生更多的细根($5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm}$)增加水分和营养吸收面积,增强机械支持能力,从而抵御不利的生长环境。

大量研究表明细根($d \leq 2 \text{ mm}$)虽然在树木根系总生物量中占的比例不到 30%,但它具有巨大的吸收表面积,是植物吸收养分和水分的主要器官^[30]。4 个采样地酸枣不同径级的根系中,细根长度是各个地区根系总长度的主要组成部分。有学者认为^[31],细根的分布深度要大于较粗根系,有利于根系对土壤水分和养分的吸收利用。研究发现,细根($d < 2 \text{ mm}$)与根总长度的分布变化特征相似,垂直方向上细根随着降雨量的减少在较深土层中的分布比例增大,可见其特征有利于酸枣根系吸收深层土壤的水分满足植株的生长发育,抵抗干旱的环境;水平方向上,根系在末端或者接近末端的地方会出现较多的细根分支,从而大大增加了细根的长度、数量、吸收表面积以及根尖数量等,提高了根系对水分的吸收能力。

本试验说明酸枣根系具有较好的可塑性,随着气候干旱程度的增加酸枣根系做出了相应的调整,如增加在较深土层中的根系的量、增大根幅等,以其深或广的根系来增强其抗旱性能,使自身更能适应缺水的生存环境。

参考文献 (References):

- [1] 石兆勇,王发园,魏艳丽. 荒漠植物的适应策略. 安徽农业科学, 2007, 35(17): 5222-5224.
- [2] 许维宏,吴宁,吴福忠. 干旱条件下植物生长适应策略研究进展. 世界科技研究与发展, 2010, 32(2): 176-179.
- [3] Kage H, Kochler M, Stützel H. Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions; measurement and simulation. European Journal of Agronomy, 2004, 20(4): 379-394.
- [4] 赵忠,李鹏,王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究. 应用生态学报, 2000, 11(1): 37-39.
- [5] 任安芝,高玉葆,王金龙. 不同沙地生境下黄柳(*Salix gordejewii*)的根系分布和冠层结构特征. 生态学报, 2001, 21(3): 399-404.
- [6] Persson H, Von Firocks Y, Majdi H, Nilsson L O. Root distribution in a Norway spruce (*Pinus abies*(L.) karst.) stank subjected to drought and ammonium-sulphate application. Plant and Soil, 1995, 168-169(1): 161-165.
- [7] 卓露,管开云,李文军,段士民. 不同生境下细叶鳶尾表型可塑性及生物量分配差异性. 生态学杂志, 2014, 33(3): 618-623.
- [8] 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): 135-139.
- [9] Cheng G, Bai Y J, Zhao Y Y, Tao J, Liu Y, Tu G Z, Ma L B, Liao N, Xu X J. Flavonoids from *Ziziphus jujube* Mill var. *spinosa*. Tetrahedron, 2000, 56(45): 8915-8920.
- [10] 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.
- [11] Meng Y J, Zhang Y W, Jiang H Y, Bao Y L, Wu Y, Sun L G, Yu C L, Huang Y X, Li Y X. Chemical constituents from the roots of *Ziziphus jujube* Mill. var. *spinosa*. Biochemical Systematics and Ecology, 2013, 50: 182-186.
- [12] Wang Y, Ding B, Luo D, Chen L Y, Hou Y L, Dai Y, Yao X S. New triterpene glycosides from *Ziziphi Spinosa* Semen. Fitoterapia, 2013, 90: 185-191.
- [13] Park J H, Lee H J, Koh S B, Ban J Y, Seong Y H. Protection of NMDA-induced neuronal cell damage by methanol extract of *Ziziphi Spinosa* Semen in cultured rat cerebellar granule cells. Journal of Ethnopharmacology, 2004, 95(1): 39-45.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 尹惠敏. 酸枣根系构型特征研究. 中国水土保持, 2012, (10): 59-61.
- [21] 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.
- [22] 朱广龙, 赵挺, 康冬冬, 魏学智. 木香薷腺毛形态结构发生发育规律的研究. 植物研究, 2011, 31(5): 518-523.
- [23] 张彦东, 沈有信, 白尚斌, 王政权. 混交条件下水曲柳落叶松根系的生长与分布. 林业科学, 2001, 37(5): 16-23.
- [24] Pergitzer K S, DeForest J L, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine North American trees. Ecological Monographs, 2002, 72(2): 293-309.
- [25] 杨鑫光. 霸王对干旱胁迫的响应及根系提水研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 6-7.
- [26] Macfall J S, Johnson G A, Kramer P J. Comparative water uptake by roots of different ages in seedlings of loblolly pine (*Pinustaeda* L.). New Phytologist, 1991, 119(4): 551-560.
- [27] 黄振英, 吴鸿, 胡正海. 30 种新疆沙生植物的结构及其对荒漠环境的适应. 植物生态学报, 1997, 21(6): 521-530.
- [28] 王沙生, 高荣孚, 吴贯明. 植物生理学(第二版). 北京: 中国林业出版社, 1991: 368-368.
- [29] 张玲, 王树凤, 陈益泰, 段红平. 3 种枫香的根系构型及功能特征对干旱的响应. 土壤, 2013, 45(6): 1119-1126.
- [30] 孙建华. 毛乌素沙地黑沙蒿根系分布及其生境适应性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [31] 韩烈保, 王琼, 王晓蓓, 辜再元, 杜永吉, 宋桂龙. 不同立地条件下荆条根系分布规律. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 231-237.