

土壤水分胁迫对红砂幼苗细根形态和功能特征的影响

耿东梅, 单立山, 李毅

(甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过盆栽人工模拟干旱试验, 研究了土壤水分胁迫对红砂幼苗细根形态及功能的影响。结果表明: (1) 随胁迫程度的加剧红砂幼苗细根直径和体积呈减小趋势, 而根长、比根长、表面积、比表面积均呈增大趋势, 表明在胁迫条件下, 红砂幼苗细根可通过根长、比根长、表面积、比表面积的增加与直径和体积的减小来适应逆境胁迫。随根序的升高红砂幼苗细根直径呈增大趋势, 而根长和比根长表现出减小趋势, 比表面积呈先升高后降低的趋势。(2) 随胁迫程度的加剧红砂幼苗细根全 C 含量呈降低趋势, 而全 N 含量先呈明显的降低趋势, 后呈升高趋势, 表明在中度胁迫下红砂幼苗细根呼吸作用明显降低。随根序的升高红砂幼苗细根全 C 含量呈增加趋势, 而全 N 含量呈下降趋势, 表明红砂幼苗较低级根序具有较强的呼吸作用与代谢活性。(3) 红砂幼苗细根根长与全 C 含量之间呈极显著正相关关系; 直径与全 C 含量之间呈显著正相关关系; 比根长与 C 含量呈显著负相关关系。

关键词: 红砂; 土壤水分胁迫; 根序; 细根形态; 细根功能

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0036-07

中图分类号: Q944.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.014

Effect of Soil Water Stress on Fine Root Morphology and Functional Characteristics of *Reaumuria Soongorica*

GENG Dong-Mei, SHAN Li-Shan, LI Yi

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of soil water stress in whole growth period on fine root morphology and function of *Reaumuria soongorica*. The results were as followings: (1) The diameter and volume decreased with the increasing of soil water stress, on the contrary, with the increasing of soil water stress, root length, specific root length(SRL), surface area and specific root surface area(SRA) increased, which indicated that under soil water stress conditions, fine root of *R. soongorica* seedling could adapt stress by the increasing root length, SRL, surface area and SRA and reducing the diameter and volume. The diameter increased with the rise of root order, root length and SRL increased, while SRA firstly increased and then reduced. (2) Total C content decreased with the increasing of soil water stress, while with soil water stress increasing total N content first decreased significantly and then showed the increasing tendency, which indicated that respiration of fine roots of *R. soongorica* seedling was restrained under medium soil water condition. Total C content increased with the rise of root order, total N content decreased, which indicated that the low roots have stronger respiration and metabolic activity. (3) The root length had a highly significant positive correlation with C content. The diameter had a significant positive correlation with C content. The SRL was negatively correlated with C content.

Keywords: *Reaumuria soongorica*; soil water stress; root order; fine root morphology; fine root function

水分胁迫是干旱、半干旱区一种最普遍的环境胁迫, 是影响该区植被恢复的重要因素^[1], 植物对其变化的响应主要是通过根系进行^[2]。植物根系是植株

体之所以矗立于地面的固着器官, 是植物吸收水分和营养物质的主要器官, 是连接植物体地上部分和土壤环境的枢纽, 其发育状况直接影响地上部分的形态建

收稿日期: 2013-10-29

修回日期: 2013-12-03

资助项目: 国家国际科技合作专项“荒漠区典型抗旱灌木树种种质资源保护与利用合作研究”(2012DFR30830); 国家自然科学基金项目(41361100; 31360205); 甘肃省科技支撑计划项目(1204NKCA084)

作者简介: 耿东梅(1988—), 女(汉族), 甘肃省环县人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠植物生理生态。E-mail: gengdm123@163.com。

通信作者: 李毅(1962—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 博士, 博士生导师, 主要从事林木遗传育种研究工作。E-mail: liyi@gsau.edu.cn。

成^[3]。因此,研究根系对土壤水分胁迫的响应揭示植物抗旱性的本质具有重要意义。近年来,关于土壤水分胁迫对根系形态和功能特征研究已有一定的报道^[4-7]。可见,根系形态和功能特征及其与土壤水分的关系已成为研究热点。但由于根土系统的非直观性和根系研究方法的局限性,目前对根系研究的广度和深度尚较薄弱,尤其对灌木的研究更少,有待于进一步进行研究。红砂(*Reaumuria soongorica*)属于柽柳科(Tamaricaceae)多年生超旱生小灌木,主要生长在荒漠,半荒漠的山地丘陵,剥蚀残丘,戈壁,是荒漠灌丛植被的主要优势种和建群种之一,其抗逆性强,生态可塑性大,具有很强的抗旱、耐盐和集沙能力;对荒漠地区的生态保护具有重要作用^[8]。目前,我国对红砂的研究主要集中在地上部分的抗旱生理^[9]、解剖学特征^[10]、光合特性^[11]以及种子萌发等方面^[12],而关于地下部分的研究仅限于根系构型方面^[13-14],且对人工控水条件下根系形态与功能方面的研究很少。因此,本研究以红砂为研究对象,通过不同含水量下根系变化的分析,以揭示红砂幼苗细根形态和功能特征对土壤含水量变化的响应机制,探讨红砂幼苗细根形态和功能的关系,从而为红砂植被保护、恢复、重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试苗木为超旱生灌木红砂的2 a生容器苗;供试土壤为兰州地区黄土丘陵黄绵土(田间持水量为20.12%)。在进行栽培前,对土样进行过筛去杂。

1.2 试验设计

采用盆栽人工模拟干旱试验,设置3个处理水平,控水方法采用植物水分梯度划分法,即CK(田间持水量的[(80±5)%]、MS(田间持水量(50±5)%和SS(田间持水量的(30±5)%],每个处理20盆(以防后期控水过程中出现死苗现象,剩余材料不足够试验所用)。于4月初每盆植入1株,定植后充分灌水,保证成活和正常生长。待6月初置可移动式防雨棚内,开始按设计要求控水。为消除苗木自身重量对控水试验准确性的影响,各处理均毁苗1盆测其鲜重,确定称重标准。通过自然落干至土壤含水量达到设定标准,后对花盆称重。每天在同一时间(18:00)称重,之后加水至土壤含水量达到控水要求。为了减少其本身的生长、温度和湿度等环境变化给土壤水分控制带来的误差,应以初次测算供水量相同的方法和测定时间,每7 d对其土壤含水量测定一次,重新计算每个花盆的日供水量。10月份开始采样,进行根系形

态与功能特征的观测。

1.3 根系采样与分析

采用流水冲洗法将整个根系小心地洗出,按照Berntson^[15]和Strahler^[16]的方法对细根进行分级,在根冠层内,由外及内确定根序,外层的第1小根为第一级,两个第一级相遇为第二级,依此类推,若有不同根级相遇,相遇后以较高的作为根级。分级后用Win-RHIZO 2008a根系分析仪对根系进行扫描,测定其形态参数(直径、根长、表面积、体积),扫描后,将其分别装入信封内,放入85℃烘箱中(24 h)以测定生物量。粉碎后,采用重铬酸钾氧化—风光光度计法测定全碳,采用凯氏滴定法测定全氮。

1.4 数据分析

根据Win-RHIZO 2008a记录的根长、表面积、直径、体积等数据与测定的细根生物量,计算出不同土壤水分胁迫下的细根比根长和比表面积。计算公式为:

$$\text{比根长} = \text{根长(m)} / \text{生物量(g)}$$

$$\text{比表面积} = \text{表面积(cm}^2\text{)} / \text{生物量(g)}$$

利用SPSS 13.0统计软件进行方差分析和相关性分析,采用Excel软件进行计算和绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤水分胁迫下细根形态参数的比较

2.1.1 土壤水分胁迫对红砂幼苗细根长和表面积的影响 由表1可知,土壤水分胁迫促进了根系的伸长生长,随胁迫程度的加剧,各序级根长均表现出增加的变化趋势,在重度胁迫下,各序级根长均达到最大,与对照组(CK)相比,中度和重度土壤水分胁迫下总根长分别增加了27.06%和47.54%,表明红砂幼苗细根在该土壤水分胁迫条件下表现出良好的正向水性,根系生长明显变快。细根分级后,随根序的升高,各土壤水分胁迫下根长均明显减小,且1级根与2级根根长均大于3级根根长,其中1级根根长占总根长的比例高达52.74%,2级根根长占37.01%,3级根根长占10.25%,表明红砂幼苗在其发育过程中主要是增加低级侧根根长,扩大横向吸水面积,获取更多的水分。方差分析表明,土壤水分、土壤水分和根序的交互作用对红砂幼苗细根长均无显著性($p > 0.05$)影响,而根序对其的影响达到极显著性水平($p < 0.01$)(表2),表明不同土壤水分条件下红砂均可通过低级根序的生长来吸收更多的水分和养分。

土壤水分对红砂幼苗细根表面积也有一定的影响。随土壤水分胁迫程度的增加根系总表面积逐渐增加,表明在土壤水分胁迫条件下,红砂可通过增加根系表面积来提高对水分和养分的吸收机会,以

抵抗土壤水分胁迫。细根分级后,各土壤水分条件下根表面积均随根序的升高呈现出先增大后减小的变化趋势,其中 1 级和 2 级根表面积占总表面积的比例较大,表明红砂幼苗在其发育过程中主要通过低级根

表面积的增加扩大横向吸水面积。方差分析表明,土壤水分、土壤水分和根序的交互作用对红砂幼苗细根长均无显著性($p>0.05$)影响,而根序对其的影响达到极显著性水平($p<0.01$)(表 2)。

表 1 不同土壤水分胁迫下的细根根长、表面积

土壤水分胁迫	根长/m			总根长/m	根表面积/cm ²			总根表面积/cm ²
	1	2	3		1	2	3	
CK	16.83±4.28a	13.57±2.16a	3.59±0.45a	33.99	88.82±27.49a	179.80±33.03a	67.14±9.17a	335.76
MS	24.04±6.97a	14.78±6.51a	4.38±1.59a	43.20	126.41±38.18a	156.08±66.16a	60.81±16.04a	343.30
SS	26.30±2.27a	18.79±0.17a	5.07±0.56a	50.16	138.96±23.18a	251.69±50.84a	86.88±9.87a	477.53

注:CK 代表对照;MS 代表中度土壤水分胁迫;SS 代表重度土壤水分胁迫。1 表示 1 级根,2 表示 2 级根,3 表示 3 级根。下同。

表 2 根序和水分对细根根长、直径、表面积、比根长、比表面积、体积、C、N 含量及 C/N 比影响的方差分析

变异来源	根长	细根直径	根表面积	总根体积	比根长	比表面积	C 含量	N 含量	C/N 比
水分—根序	>0.05	>0.05	>0.05	<0.05*	>0.05	>0.05	<0.000 1**	>0.05	>0.05
水分	>0.05	>0.05	>0.05	<0.05*	>0.05	>0.05	<0.05*	<0.05*	>0.05
根序	<0.000 1**	<0.05*	<0.05*	<0.05*	<0.01**	<0.01**	<0.000 1**	<0.05*	<0.05*

注:* 表示相关性显著; ** 表示相关性极显著。下同。

2.1.2 土壤水分胁迫对红砂幼苗细比根长和比表面积的影响 由表 3 可知,不同土壤水分胁迫之间的红砂幼苗细根比根长和比表面积也各不相同,随土壤水分胁迫程度的加剧,除 3 级根比根长外,各序级比根长和比表面积均表现出增大的变化趋势。与对照组(CK)相比,中度和重度土壤水分胁迫下的比根长分别增大了 29.18% 和 37.31%,比表面积分别增加了 29.07% 和 52.37%。不同根序之间的比根长和比表面积也各不相同,对同一土壤水分不同根序的比根长

和比表面积进行了分析,发现随根序的升高,各土壤水分条件下红砂幼苗细根比根长,表现出逐步减小的变化趋势,而比表面积均呈现先升高后降低的变化趋势,但 3 级根的比表面积不会低于 1 级根的,以 2 级根的最大。

方差分析表明,土壤水分以及土壤水分和根序的交互作用对比根长和比表面积的影响均不显著,但根序对比根长和比表面积的影响达到差异极显著水平(表 2)。

表 3 不同土壤水分胁迫下的细根比根长和比表面积

土壤水分胁迫	比根长/(m·g ⁻¹)			总比根长/(m·g ⁻¹)	比表面积/(cm ² ·g ⁻¹)			总比表面积/(cm ² ·g ⁻¹)
	1	2	3		1	2	3	
CK	39.42±2.39a	37.41±9.73a	12.74±1.81a	89.57	203.13±19.73a	496.17±133.75a	237.57±35.08a	936.87
MS	53.92±19.62a	49.57±10.15a	26.98±5.43a	130.47	282.54±106.92a	538.37±131.89a	388.28±48.03a	1 209.19
SS	60.90±4.63a	53.09±5.22a	24.69±8.99a	138.68	320.77±51.81a	694.91±105.89a	411.87±131.77a	1 427.55

2.1.3 土壤水分胁迫对红砂幼苗细直径和体积的影响 由图 1 可知,不同土壤水分胁迫之间的红砂幼苗细根直径和体积各异,随胁迫程度的加剧 1 级根直径和体积均表现出逐步减小的变化趋势,2,3 级根表现出递减的变化趋势,且对不同土壤水分胁迫下细根直径和体积的平均值进行了分析,发现随土壤水分胁迫程度的加剧细根直径和体积均呈减小趋势,直径分别为 1.193,0.954,0.940 mm;体积分别为 3.46,2.18,2.09 cm³。分级后,随根序的升高,各土壤水分胁迫下细根直径逐渐变粗,而体积表现为先增加后减小的变化趋势。方差分析表明,土壤水分、土壤水分

和根序的交互作用对根直径的影响均不显著,但根序对直径的影响达到显著水平;而土壤水分、根序与土壤水分和根序的交互作用对根体积的影响均达到差异显著水平(表 2)。

2.2 土壤水分胁迫下细根的分级及养分特征

由图 2 可知,不同土壤水分胁迫之间的红砂幼苗细根全 C 含量各异,除 2 级根外,同一根序全 C 含量均随土壤水分胁迫程度的加剧而呈现出降低的变化趋势,且对不同土壤水分处理下全 C 含量的平均值进行了分析,发现随土壤水分胁迫的增加全 C 含量呈减少的趋势,其值分别为 61.149%,60.042%,

56.025%。与对照组(CK)相比,中度和重度土壤水分胁迫的红砂幼苗细根全 C 含量分别降低了 1.81%、8.34%。

细根分级后,随根序的升高而表现出增加的变化趋势,其中以 3 级根的最高,达到 66.51%,2 级根的

次之,为 62.09%,1 级根低至 48.62%。方差分析结果表明,根序、土壤水分和根序的交互作用对红砂幼苗细根全 C 含量的影响均达到极显著水平($p < 0.01$),土壤水分对红砂幼苗细根全 C 的影响呈显著水平($p < 0.05$)(表 2)。

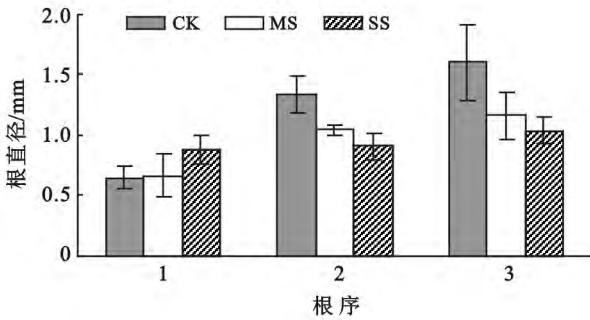


图 1 不同土壤水分胁迫下的 1-3 级细根直径和体积

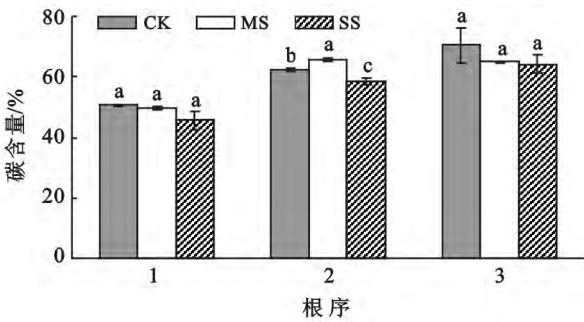
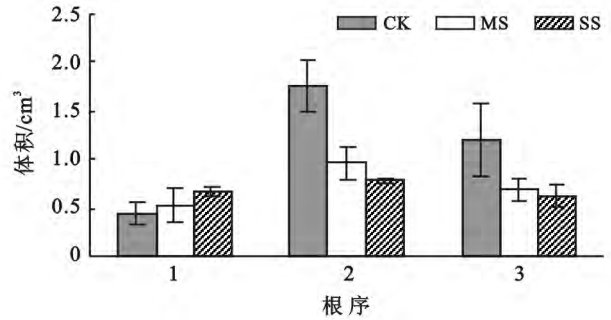


图 2 不同土壤水分胁迫下的 1-3 级细根 C 含量

高而升高。方差分析结果表明,根序对红砂幼苗细根 C/N 比的影响达到显著性水平($p < 0.05$),而土壤水分与土壤水分和根序的交互作用对其的影响未达到差异显著性($p > 0.05$)(表 2)。

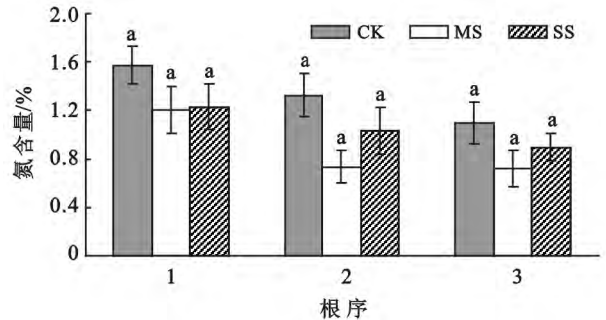


图 3 不同土壤水分胁迫下的 1-3 级细根 N 含量

由图 3 可知,不同土壤水分胁迫下的红砂幼苗细根全 N 含量不同,随着土壤水分胁迫加剧呈现出先减少后增加的变化趋势,且以对照组的全 N 含量最高。与对照组(CK)相比,中度和重度土壤水分胁迫的红砂幼苗细根全 N 含量分别降低了 33.33%和 21.02%,表明在中度土壤水分胁迫条件下红砂各级细根呼吸作用有所降低,而在重度胁迫条件红砂可通过增加根系呼吸来适应其胁迫环境。与全 C 含量的变化趋势相反,各土壤水分条件下细根全 N 含量随根序的升高呈现出下降的变化趋势,表明较低级根序具有较强的呼吸作用与代谢活性。方差分析结果表明,水分和根序对红砂幼苗细根全 N 的影响均达到显著水平($p < 0.05$),但水分和根序的交互作用对红砂幼苗细根全 N 无显著性影响($p > 0.05$)(表 2)。

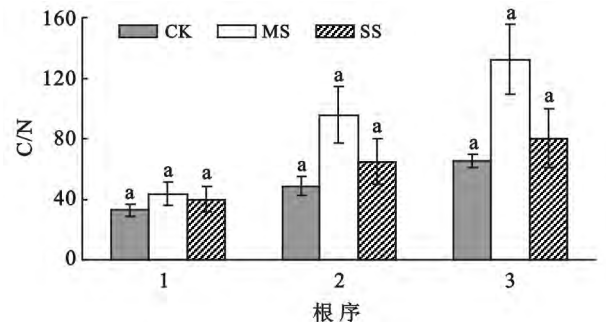


图 4 不同土壤水分胁迫下的 1-3 级细根 C/N

由图 4 可知,不同土壤水分胁迫下红砂幼苗细根 C/N 比也各不相同。随土壤水分胁迫的加剧呈现出先增加后减少的变化趋势,与对照组(CK)相比,中度和重度胁迫下的红砂幼苗细根 C/N 比分别升高了 84.53%和 25.62%。与全 C 含量变化趋势一致,各土壤水分条件下红砂幼苗细根 C/N 比均随根序的升

2.3 细根形态与功能特征的关系

由表 4 可知,红砂幼苗细根的形态参数与功能指标之间存在一定的联系,根长与全 C 含量之间呈极显著正相关;细根直径与全 C 含量之间呈显著正相关;比根长与 C 含量呈显著负相关。而其他形态参数与

功能指标之间均未达到显著相关关系,其中细根直径与全 N 含量之间表现出负相关;根表面积和比表面积与全 C 和 N 之间呈负相关;比根长全 N 含量之间表现出正相关;根体积与全 C 和 N 含量之间呈相关;分析表明根系形态与功能特征之间存在着非常紧密的联系。

表 4 细根根长、直径、表面积、比根长、比表面积、体积与 C,N 含量的相关性分析

项目	根长	根直径	根表面积	根体积	比根长 SRL	比表面积 SRA
C 含量/%	0.63**	0.48*	-0.05	0.36	-0.49*	-0.21
N 含量/%	0.22	-0.27	-0.03	0.04	0.26	-0.10

3 结果讨论

3.1 土壤水分胁迫下幼苗细根形态的比较

植物根系会根据土壤水分供应状况作出综合的适应性反应,能够显著地影响植物从土壤中吸收水分和养分的能力^[17]。根系形态的适应性响应是植物应对生境条件的基本机制之一^[18]。当水分成为限制植物生长的条件时,根系会产生形态、生理等方面的变化来适应其逆境胁迫^[19]。近年来, Jongrunklan 等^[4]研究发现植物可通过增大根长、比根长、根表面积、根比表面积和减小根系直径来表现出较强的抗旱性。韩德梁等^[20]也研究发现细根长随土壤水分胁迫程度的加剧而逐渐增大,但细根直径随胁迫程度的加剧而逐渐变细。韦兰英等^[21]研究发现随土壤水分胁迫加剧细根比根长表现出逐步增大的趋势。梁银丽等^[22]研究发现土壤水分胁迫处理使根系比表面积增大。蔡丽平等^[6]研究指出干旱胁迫使细根直径变细,但根长、根表面积、比表面积在干旱胁迫条件下反而增加。本研究发现,红砂幼苗细根形态特征随胁迫程度不同而各自表现出不同的变化趋势,土壤水分胁迫使红砂幼苗细根根长、比根长、表面积、比表面积增大,根直径和根体积减小,这可能是由于植物体内存在某种信号传导和生理调节机制所致^[23],表明红砂幼苗细根具有明显的形态可塑性。在土壤水分胁迫下,红砂幼苗细根为了获取水源,通过缩小根直径、减少根体积、增加比根长和比表面积等适应策略,增加根系—土壤接触面扩大根系吸收范围,提高吸收能力,增强红砂抗旱能力,使红砂在干旱条件下仍然生长较好。因此,红砂具有很强的抗旱和耐旱能力,红砂根系增强延伸能力、扩大与土壤接触面积是对干旱逆境的形态学响应机制之一。研究结果表明,细根分级后,各水分条件下细根形态特征随根序也表现出一

定的差异性。根直径、根长和比根长的变化情况与刘佳等^[24]的研究结果相似,随根序的升高,各水分条件下红砂幼苗细根根长表现出递减的变化趋势,且 1 级根根长占前 3 级根总长度的 50% 以上,表明红砂幼苗细根主要通过增大低级根根长来提高对水分和养分的利用效率^[25],也意味着红砂幼苗细根生长过程和死亡过程可能是相似的,即低级根寿命短,高级根寿命长^[26]。相反,随根序的升高,各水分条件下红砂幼苗细根直径表现出逐步变粗的趋势、比根长呈现出减小的趋势,符合相对生长理论^[27],说明低级根更有利于植物对水分和养分的吸收,而高级根直径较低级根粗这对碳储存具有重要作用。

3.2 土壤水分胁迫下根系营养元素含量的差异

干旱胁迫对植物根系中 C 和 N 含量有着一定的影响,且植物组织 C 和 N 含量与生理生态功能有着密切的联系^[28]。有研究^[29]显示,根呼吸作用与 N 含量呈显著正相关,而植物根系呼吸会消耗一定量的 C^[7],说明根呼吸作用与 C 含量呈负相关关系。本研究发现,随胁迫程度加剧红砂幼苗细根全 C 含量呈逐步降低趋势,而全 N 含量先表现出明显的降低趋势,后呈现出逐步升高趋势,且以正常水分条件下全 C,N 含量最高。在中度土壤水分胁迫下红砂幼苗细根 N 含量减少致使呼吸作用减弱,这可能是因植物根系吸收氮量减少,或是土壤水分胁迫使根系体内氮素重新分配所致。但在重度土壤水分胁迫下,其 N 含量又呈增加趋势,这表明在土壤水分胁迫下红砂幼苗细根可通过调节 C,N 含量的变化来实现逆境胁迫下对养分的吸收以保证植物正常生长。本试验结果发现,细根分级后,在同一胁迫下的红砂幼苗各级细根 C,N 含量变化趋势与 Guo 等^[30]的研究结果一致,因根序的上升,全 C 含量呈现出逐渐增加的变化趋势,而全 N 含量表现为逐渐降低的变化趋势,由于低级根(如 1 级根)具有养分含量高,代谢速率快,木质化程度低的特征,因而吸收功能很明显 Guo 等^[26],高级根(如 3 级根)具有同低级根相反的特征,因而运输和储藏是高级根最主要的特点 Guo 等^[26],而且,其本身含有大量死亡细胞,组织整体代谢低,抵御胁迫能力强^[31],所以 1 级根是整个根系中活动最强烈的部分,根尖细胞分裂旺盛,N 浓度最高,导致呼吸速率较快^[29,32],致使大量的 C 被消耗。同时,基于 1 级根吸收、运输收水分和养分,大量的 C 又会被消耗,所以低级根 C 含量较低。

3.3 土壤水分胁迫下根系形态与碳、氮含量的关系

植物根系作为养分和水分的直接利用者,当外界养分缺乏时,植物通过改变根系形态获取所需养

分^[33]。杨铁钊等^[34]也研究发现,植物根系形态特征变化与根系养分吸收有着密切的联系,也有研究^[35]认为细根直径与C和N浓度密切相关,随着直径增加,C浓度增加,N浓度降低,即直径大小与细根中的N含量呈负相关关系。本研究结果发现,红砂幼苗细根直径和根长与C含量之间呈显著正相关关系,但直径与N含量呈负相关;这意味着越粗越长的根系越有利于植物对碳的储存。相反,比根长和比表面积与细根C含量之间呈负相关关系,而与N含量呈正相关。也就是说直径越细的根,单位重量的根长度越长,表面积越大,则吸收水分和养分的吸收效率也越高。因此,红砂幼苗细根形态与功能特征存在紧密联系。

4 结论

(1) 红砂幼苗细根具有明显的形态可塑性,在土壤水分胁迫条件下,细根可通过增大比根长和比表面积、减小直径等适应策略来增加根—土壤接触面,扩大根系吸收范围,提高吸收能力,增强其抗旱能力。

(2) 在土壤水分胁迫下,红砂幼苗细根可通过调节C、N含量的变化来实现逆境胁迫下对养分的吸收以保证植物正常生长。

(3) 随着根序的升高,细根直径增加、比根长降低、比表面积先增大后减小,C含量升高,N含量降低,且根序对根系形态特征和养分含量指标都达到显著性影响,表明红砂幼苗细根形态和功能特征与根序有高度的相关性,但其相关性还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 刘国花,韩素英,齐力旺.植物抗旱耐盐基因工程研究及应用前景[J].世界农业,2003,29(7):44-46.
- [2] Fitter A H. Functional Significance of Root Morphology and Root System Architecture Ecological Interaction Soil; Plants, Microbes and Animals [M]. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1985:87-106.
- [3] 程建峰,戴廷波,荆奇,等.不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收[J].土壤学报,2007,44(2):266-272.
- [4] Jongrunklang N, Toomsan B, Vorasoot N, et al. Rooting traits of peanut genotypes with different yield responses to pre-flowering drought stress[J]. Field Crops Research, 2011, 120(2): 262-270.
- [5] Wang Hong, Siopongco J, Wade L J, et al. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(2/3):338-344.
- [6] 蔡丽平,吴鹏飞,侯晓龙,等.类芦根系对不同强度干旱胁迫的形态学响应[J].中国农学通报,2012,28(28):44-48.
- [7] Hall A J, Connor D J, Whitfield D M. Root respiration during grain filling in sunflower: The effects of water stress[J]. Plant and Soil, 1990, 121(1): 57-66.
- [8] 董秋莲,李毅,单立山,等.张掖市龙首山红砂种群结构和分布格局研究[J].水土保持通报,2013,33(4):284-288.
- [9] 左利萍,李毅,焦健.水分梯度下不同地理种群红砂叶片生理特征比较研究[J].中国沙漠,2009,29(3):514-518.
- [10] 刘玉冰.荒漠复苏植物红砂抗旱机理的生理生态学特性研究[D].甘肃兰州:兰州大学,2006.
- [11] 种培芳,李毅,苏世平,等.红砂3个地理种群的光合特性及其影响因素[J].生态学报,2010,30(4):914-922.
- [12] 宋雪梅,杨九艳,吕美婷,等.红砂种子萌发对盐胁迫及适度干旱的响应[J].中国沙漠,2012,32(6):1674-1680.
- [13] 单立山,李毅,任伟,等.河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J].应用生态学报,2013,24(1):25-31.
- [14] 单立山,李毅,董秋莲,等.红砂根系构型对干旱的生态适应[J].中国沙漠,2012,32(5):1283-1290.
- [15] Berntson G M. The characterization of topology: A comparison of four topological indices for rooted binary trees[J]. Journal of Theoretical Biology, 1995, 177(3): 271-281.
- [16] Strahler A N. Hypsometric(area altitude) analysis of erosional topology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952,63(11):1117-1142.
- [17] 张娜,梁一民.干旱气候对白羊草群落地下部生长影响的初步观察[J].应用生态学报,2002,13(7):827-832.
- [18] Hutchings M J, de Kroon H. Foraging in plants: The role of morphological plasticity in resource acquisition [J]. Advances in Ecological Research, 1994, 25(1), 159-238.
- [19] Pierret A, Doussan C, Capowiez Y, et al. Root functional architecture: A framework for modeling the interplay between roots and soil[J]. Vadose Zone Journal, 2007, 6(2): 269-281.
- [20] 韩德梁,王彦荣.紫花苜蓿对干旱胁迫适应性的研究进展[J].草业学报,2006,14(6):7-13.
- [21] 韦兰英,上官周平.黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性[J].生态学报,2006,26(12):4165-4170.
- [22] 梁银丽,陈培元.土壤水分和氮磷营养对小麦根系生理特性的调节[J].植物生态学报,1996,20(3):255-262.
- [23] 娄成后.植物水分平衡中根-冠间的信号传递与整体行动[J].植物学通报,2000,17(5):475-477.
- [24] 刘佳,项文化,徐晓,等.湖南会同5个亚热带树种的细根构型及功能特征分析[J].植物生态学报,2010,34(8):938-945.

- [25] Hishi T. Heterogeneity of individual roots within the fine root architecture: Causal links between physiological and ecosystem function[J]. *Journal of Forest Research*, 2007, 12(2):126-133.
- [26] Guo D L, Li H, Mitchell R J, et al. Fine root heterogeneity by branch order: Exploring the discrepancy in root turnover estimates between minirhizotron and carbon isotopic methods[J]. *New Phytologist*, 2008, 177(2):443-456.
- [27] Wang Zhengquan, Guo Dali, Wang X R, et al. Fine root architecture, morphology and biomass of different branch orders of two Chinese temperate tree species [J]. *Plant and Soil*, 2006, 288(1): 155-171.
- [28] Eissenstat D M, Yanai R D. The ecology of root lifespan[J]. *Advance in Ecological Research*, 1971, 27(1): 1-60.
- [29] 贾淑霞,赵妍丽,丁国泉,等. 落叶松和水曲柳不同根序细根形态结构、组织氮浓度与根呼吸的关系[J]. *植物学报*, 2010, 45(2):174-181.
- [30] Guo Dali, Mitchell R J, Hendricks J J. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest[J]. *Oecologia*, 2004, 140(3):450-457.
- [31] 常文静,郭大立. 中国温带、亚热带和热带森林 45 个常见树种细根直径变异[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1248-1257.
- [32] Ryan M G, Hubbard R M, Pongracic S, et al. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status[J]. *Tree Physiol.*, 1996, 16(3):333-343.
- [33] 赵秋芳,胡承孝,孙学成,等. 冬小麦不同钼效率品种钼吸收差异及其与根系形态特征的关系[J]. *华中农业大学学报*, 2013, 32(2):67-71.
- [34] 杨铁钊,范进华. 不同基因型烤烟品种吸收钾差异的根系特性研究[J]. *西北农业学报*, 2006, 15(3):41-44.
- [35] 郭淑霞,赵妍丽,丁国泉,等. 落叶松和水曲柳不同根序细根形态结构、组织氮浓度与根呼吸的关系[J]. *植物学报*, 2010, 45(2):174-181.

(上接第 35 页)

- [7] Miretzky P, Bisinoti M C, Jardim W F. Sorption of mercury (II) in Amazon soils from column studies[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(11): 1583-1589.
- [8] Yin Yunjun, Allen H E, Li Y, et al. Adsorption of mercury (II) by soil: effects of pH, chloride, and organic matter [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(4): 837-844.
- [9] Jing Y D, He Z L, Yang X E. Adsorption-desorption characteristics of mercury in paddy soils of China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(2): 680-688.
- [10] Liu Jia, Dai Jiulan, Rang Renqing, et al. Adsorption/desorption and fate of mercury (II) by typical black soil and red soil in China[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2010, 19(5): 587-601.
- [11] 李英华,孙丽娜. pH 值和外加汞浓度对汞在棕土中的吸附—解吸动力学特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2):576-582.
- [12] 杨国治,夏家琪,戎捷. 土壤中汞的固定与释放的初步研究[J]. *土壤学报*, 1979, 16(1):38-43.
- [13] 白瑛,张祖锡,郁明谏,等. 土壤条件与汞的富集和迁移[J]. *北京农业大学学报*, 1986, 12(8):301-306.
- [14] 隋红建,饶纪龙. 土壤离子吸附机理模型及其应用[J]. *土壤学进展*, 1995, 23(1):27-31.
- [15] Xue Tong, Wang Renqing, Zhang Mengmeng, et al. Adsorption and desorption of mercury (II) in three forest soils in Shandong Province, China[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(2):265-272.
- [16] 荆延德,赵石萍,何振立. 土壤中汞的吸附—解吸行为研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, 41, (5):1270-1274.
- [17] 王斐,王敏,唐景春,等. Hg 在玲珑金矿区典型农田土壤中的吸附特征研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(9):2669-2675.