

不同灌溉量对绿洲-荒漠过渡带多枝 柽柳幼苗根系生长和分布的影响

王会提^{1,2,3,4},曾凡江^{1,2,3},张波^{1,2,3},刘波^{1,2,3,4},
李尝君^{1,2,3,5},高欢欢^{1,2,3,4},郭自春^{1,2,3,4}

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011;2 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测试验研究站,新疆策勒 848300;3 中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室,乌鲁木齐 830011;4 中国科学院大学,北京 100049;5 新疆大学 研究生院,乌鲁木齐 830046)

摘要:为了探讨绿洲-荒漠过渡带上受损柽柳群落幼苗适宜生长的土壤水分条件,在塔南策勒绿洲外围设置 A(不灌溉)、B(适度灌溉)、C(充分灌溉)3 个处理的田间试验,于 7~10 月份考察了各处理柽柳幼苗粗根(>2 mm)和细根(<2 mm)生物量积累、空间分布等变化特征。结果显示:(1)随着灌溉量的增加,柽柳根系生物量积累不断增加,且在生长季末(10 月份)增速最大,同时细根占总根重的比例从 20.5% 上升到 29.8%,显著提高了幼苗吸收养分和水分的能力。(2)干旱胁迫(处理 A)下柽柳幼苗根系的下扎深度大,但水平根幅的扩展却有限;适度灌溉(处理 B)的生物量较处理 A 大,但小于处理 C;根系扎根深度表现为处理 A>处理 B>处理 C,各指标均处于中间状态;水分条件最好(处理 C)时虽然垂直扎根深度小,但水平根幅最大,可以更有效利用浅层土壤资源。(3)柽柳幼苗大量根系集中在 0~40 cm 的土壤表层,而且水分条件越好,这种集中趋势越明显;根系生物量随土壤深度的增加呈递减变化,细根的根长密度也有相似变化,但细根的比根长变化规律不明显,这可能与各层土壤微观环境的变化有关。研究表明,灌溉对柽柳幼苗根系的生长和分布有显著影响,充分灌溉下柽柳幼苗根系生物量积累最多且空间分布最大,该灌溉量有利于柽柳幼苗根系的正常生长和合理分布。

关键词:多枝柽柳;根系生长;根系分布;灌溉;绿洲-荒漠过渡带

中图分类号:Q944.3

文献标志码:A

Effects of Irrigation on Root Growth and Distribution of the Seedling of *Tamarix ramosissima* in Oasis-desert Ecotone

WANG Huiti^{1,2,3,4}, ZENG Fanjiang^{1,2,3}, ZHANG Bo^{1,2,3}, LIU Bo^{1,2,3,4},
LI Shangjun^{1,2,3,5}, GAO Huanhuan^{1,2,3,4}, GUO Zichun^{1,2,3,4}

(1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2 Cele National Station of Observation & Research for Desert-Grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele, Xinjiang 848300, China; 3 Key Laboratory of Biological Geographic and Biological Resources in Arid Areas, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5 Graduate School of Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: *Tamarix ramosissima* community is facing a serious degradation at southern fringe of the Takli-

收稿日期:2013-08-28;修改稿收到日期:2013-10-16

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-316);国家基金委-新疆联合基金重点项目(U1203201);国家自然科学基金项目(31070477,30870471)

作者简介:王会提(1989—),女,在读硕士研究生,主要从事荒漠植被根系生态学研究。E-mail:793807715@qq.com

* 通信作者:曾凡江,男,研究员,主要从事植物根系生态学等方面的研究。E-mail:zengfj@ms.xjb.ac.cn

makan Desert. Deficient water conditions impose restrictions on seedlings establishment and survival of *T. ramosissima*. In order to study root biomass accumulation and spatial distribution of *T. ramosissima* seedlings to provide suggestions for rehabilitating degraded ecosystem, we set up three irrigation treatments: treatment A (no irrigation), treatment B (moderate irrigation) and treatment C (sufficient irrigation) at southern fringe of the Taklimakan Desert. Result showed that: (1) Irrigation significantly affected root growth and spatial distribution. The root biomass accumulation increased gradually with increased irrigation and the biggest growth rate at the end of growth season (October). Meanwhile the proportion of fine roots also increased from 20.5% to 29.8%, which improved the ability of absorbing moisture and nutrient from soil significantly. (2) Under drought stress (treatment A), the root length of seedlings was the longest, while the horizontal distribution of root was restricted. Under moderate irrigation (treatment B), the root biomass was more than that of treatment A but less than that of treatment C; the root level distribution of *T. ramosissima* seedlings: treatment A < treatment B < treatment C. While under the best water condition of the three treatments (treatment C), the *T. ramosissima* root depth was shallow, but level distributing of root was most expander in order to use the shallow soil resources more effectively. (3) The most roots are distributed between 0~40 cm of the soil and the wetter, the centralized trend is more obvious. Root biomass was decreasing with the increase of soil depth, so had the same change of root length density of fine roots, but the change of specific root length of fine roots was unobtrusive which could be related with microcosmic environment of soil. The results showed that irrigation had a significant impact on root growth and distribution of *T. ramosissima* seedlings. Under treatment C (sufficient irrigation), the weight of root biomass is the biggest and spatial-temporal distribution is the largest compare with the others, which indicated treatment C (sufficient irrigation) is conducive to root normal growth and reasonable distribution of *T. ramosissima* seedlings.

Key words: *Tamarix ramosissima* Ledeb. ; root growth; root distribution; irrigation; oasis-desert ecotone

塔克拉玛干沙漠南缘的荒漠和绿洲过渡带上分布着大量盐生、旱生植物,这些植物的防风阻沙作用对于维护塔南绿洲的安全与稳定具有重要意义^[1]。该区域的河流都是季节性河流,因而季节性洪水对这些植被的发生和发展起着重要作用^[2]。在洪水较多的年份,离河流较远的依靠洪水漫溢的中生或旱中生植物就会充分发育,较大洪水漫溢不仅会使沿河两岸的地下水得到补给,还能淡化地下水盐度,并通过地下水来促进植物的生长^[3]。近几十年来,由于进入沙漠的河水流量急剧减少,降低了河漫滩形成的机会,荒漠河岸植物种子的天然更新受到限制^[4];另外人类活动在一定程度上也改变了植物群落的生境^[5],由于人工绿洲的扩大,灌溉用水剧增,原有水量的地域分配平衡被打破^[2]。这造成塔克拉玛干沙漠南缘的策勒绿洲与其周围荒漠面积都在扩大,而两者之间的过渡带则在缩小^[6]。

多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)是过渡带植物群落的主要建群种之一,由于长期得不到夏季洪水漫灌,生境明显旱化、沙化,植物群落出现明显的衰退现象。尤其是沙漠边缘分布的少量柽柳灌丛,已严重退化,形成巨大的柽柳包,呈现出沙漠化景观^[7]。因此有必要采用人工辅助的方式进行灌

溉以恢复其生境。

但在干旱地区水资源十分有限,自然植被分布与地表水和地下水的分布密切相关^[8]。如何有计划合理地利用这些宝贵水源,是亟待解决的问题。段争虎等研究表明,不合理的灌溉不仅造成资源、能源和人力的巨大浪费,而且高矿化度水的过量灌溉易造成土壤次生盐渍化^[9]。同时有学者研究表明在植物达到最优水分条件后再增加灌水是一种浪费^[10-11],还有学者认为植株营养生长对土壤水分状况非常敏感,灌水超过一定值后植物产量反而会降低^[12]。而且不同的灌溉措施会导致植物根系密度分布的差异,而根系在时间和空间上的发育状况则决定了其在生长期对水分和养分的吸收利用能力,从而直接影响地上部分的生长^[13]。因此,在干旱地区进行合理灌溉,根系的因素需要引起足够重视,因为采取合理的灌溉制度,可以有效地促进植物根系的合理分布,进而快速进行植被恢复。

本研究通过设置灌溉梯度实验,探讨柽柳幼苗根系生长和分布对不同灌溉量的响应特征,为确立柽柳幼苗生长适宜的土壤水分条件,提高干旱区的水分利用效率提供理论依据,也为当地生态恢复中的幼苗培育和灌溉管理提供参考。

1 研究区自然概况

研究区策勒绿洲位于塔克拉玛干沙漠南缘,昆仑山北麓,地处 $80^{\circ}03'24''\sim82^{\circ}10'34''E$, $35^{\circ}17'55''\sim39^{\circ}30'00''N$ 。该地区是典型的大陆性干旱气候,年平均温度 $11.9^{\circ}C$ 。多年平均降水量仅 35.1 mm ,且主要集中在5月和7月。平均蒸发力 2595.3 mm ,干燥度 20.8 。常年多风并以西北风为主风向,土壤以风沙土为主。策勒绿洲有9条季节性河流,均属于降雨、积雪融水和冰川融水综合补给性河流,且洪水季节与枯水季节流量悬殊。年径流总量为 5.85亿 m^3 ,但季节分配极不均衡,春季占 9.13% ,夏季占 76.18% 。当昆仑山的融雪水超出河流容量时就会出现夏季洪水。一般来说,7月份和8月份,当河水的流量超过调控、利用量时,多余的洪水就被引到绿洲前沿对自然植被进行灌溉。发源于昆仑山的策勒河是当地的主要外来补给河流,多年平均径流量为 $1.27\times10^8\text{ m}^3$ 。

2 材料和方法

2.1 试验材料及处理

多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)为柽柳科柽柳属落叶小乔木或灌木,树高 $1.3\sim8\text{ m}$,多分枝,茎红色,叶卵状披针形,长 $0.5\sim2\text{ mm}$,总状花序,淡红或紫红色,蒴果长圆锥形,耐旱耐盐碱,是分布最为广泛的柽柳属植物之一,主要分布于西藏西部、新疆、青海柴达木盆地、内蒙古西部、甘肃和宁夏等西北干旱区。多枝柽柳生于河漫滩、河谷阶地和沙质粘土质盐碱化平原,常形成柽柳风积沙包,是干旱沙漠地区独特的景观之一。塔克拉玛干沙漠南部策勒绿洲边缘的柽柳群落分布对维护当地脆弱的生态环境具有重要作用。

2010年3月底开始,在策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站的苗圃试验田布置试验样地,试验占地面积为 400 m^2 ,共分9个 $4\text{ m}\times8\text{ m}$ 的小区,试验小区的初始环境条件基本相似,各小区间挖有宽 0.8 m 、深 3 m 的阻隔带,带内四周铺设双层防渗膜后填土压实。每个小区按照 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 的株行距播撒柽柳种子 $3\sim5$ 粒,播种后浇少量水确保种子萌发并铺设地膜,待出苗后揭去地膜。每个小区留苗25株左右,每个处理共约75株,确保试验用苗。5月起进行模拟洪水灌溉,共设置A、B、C3个灌溉处理,其灌溉量分别为每月每平方米试验小区内灌水 0 、 0.1 和 0.2 m^3 ,采用事先铺好的水管漫

灌,水量由水表控制。每个处理设置3个重复小区,灌溉处理至10月结束。

2.2 测定指标与方法

从7月份起进行根系调查,至10月结束,共分4次。具体调查时间为7月27~30日、8月29~31日、9月28~30日和10月27~31日。调查时,每种处理选择10株长势一致的幼苗,分别测定其地径、株高、冠幅,然后对所选植株的根系进行分层挖掘调查。挖掘时以植株根茎为圆心,每 20 cm 为一层分层取土挖掘,挖掘过程中采用根系追踪法和过筛法把每层的根系全部取出,截取下来的根系按照直径 $<2\text{ mm}$ 、 $>2\text{ mm}$ 分类放置。根系用水冲洗干净后用游标卡尺分别测定其直径,直径测定时在不同部位测定3个重复值;粗根的根长用钢卷尺测定,细根则放在盖有玻璃的网格纸上(mm),用镊子拉直两端测定根系长度。根系经过分层分级测定后分别装入标记好的信封,连同地上部分一并带回实验室用烘箱在 $80^{\circ}C$ 下烘干至恒重。由根系干重与其长度的比值得到不同级别根系的比根长,并由各层比根长和生物量推算各层根长密度,烘干后的地上部分和根系分别称重,然后计算根系分层生物量干重、地下生物量干重等指标。

利用土壤烘干称重法测定试验样地 $0\sim300\text{ cm}$ 内,每 20 cm 土层内土壤含水率的变化,每月进行3次,取其平均数作为当月的土壤含水量。

2.3 数据处理

试验数据的统计分析利用SPSS 16.0软件进行,利用Excel 2003和Origin 8.0分别进行数据计算和图形制作。

3 结果与分析

3.1 不同灌溉量下各土层土壤含水量的变化特征

土壤含水量影响植物的生长和代谢,其不足或过多都会影响作物的光合作用、蒸腾和气孔导度^[14]。利用土壤烘干称重法测定试验样地 $0\sim300\text{ cm}$ 内每 20 cm 土层内土壤含水率的变化,每月进行3次取其平均数作为当月的土壤含水量。经测定,试验期内各处理样地平均土壤含水量如图1所示。从图1可以看出,处理A($0\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$)表层土壤含水量最低,处理B($0.1\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$)和C($0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$)在 240 cm 处含水量最低。这可能是因为较大的灌溉量使处理B和C的土壤水分条件保持在较好状态,灌溉后土壤水分下渗较慢。在 $0\sim240\text{ cm}$ 深的土层中,处理A土壤含水量的变幅较大,240

cm 以下土壤含水量的变幅较小,而处理 B 和 C 土壤含水量的变幅始终不大。说明灌溉量越多,对土壤含水量的影响越大,对浅层土壤含水量的影响尤其明显。不同灌溉量下相同土层的土壤含水量表现为:处理 C>处理 B>处理 A。

3.2 不同灌溉量下柽柳幼苗根系生物量的积累特征

如图 2 所示,随着柽柳幼苗的生长,各处理根系总生物量积累也逐渐增加,而且增长速度在 10 月份最大;与 9 月底相比,10 月底的根系干重平均增加了 66.7%。不同灌溉量间柽柳幼苗根系生物量积累存在显著差异($P<0.05$);除 9 月份处理 B 下根系生物量稍低于处理 A 外($P>0.05$),各月份柽柳幼苗根系生物量均随灌溉量的增加而有显著增加的趋势。10 月底,处理 A 和处理 B 的根系生物量与

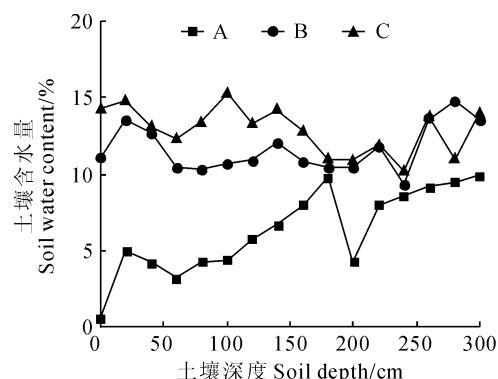


图 1 不同样地土壤含水率变化比较

A、B、C 表示灌溉处理,灌溉量分别为 0 、 0.1 和 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$;下同

Fig. 1 Comparison of the soil water content at different plots

A, B, C represent irrigation treatment; A. $0\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$;
B. $0.1\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$; C. $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$; The same as below

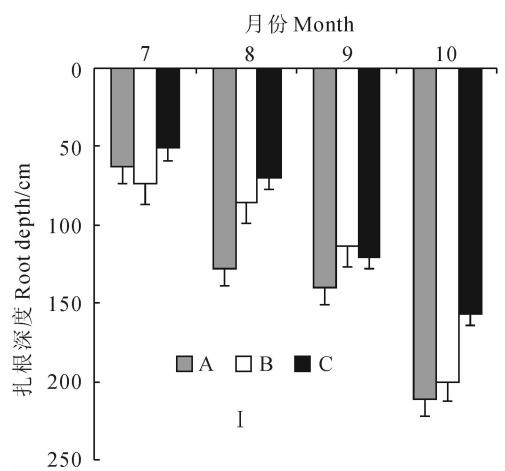


图 3 不同灌溉量下柽柳幼苗水平根幅(10 月份)和扎根深度(7~10 月份)的分布特征

Fig. 3 The root level distribution (October) and root depth (July~October) of *T. ramosissima* seedlings under different irrigation treatments

处理 C 相比,分别显著下降了 59.9% 和 17.1%。

根系中的细根($<2\text{ mm}$)生物量反映植物吸收水分和养分能力的强弱,通过细根所占的比例能反映植物根系生长的优劣状况^[15],细根在根系中所占比例越高,根系生长越好。如图 2 所示,各处理柽柳幼苗细根生物量积累也随着幼苗生长逐渐增加,而且增长速度在 10 月份最大;土壤水分条件的改善显著提高了柽柳幼苗细根的生物量,10 月底处理 C 下柽柳细根占根系总重的 29.8%,明显高于处理 B 和处理 A 所占的 25.8% 和 20.5%。较低的细根比例,则会导致幼苗吸收水分和养分的能力不足,进而会限制根系生物量的积累及整株的生长发育。

3.3 不同灌溉量下柽柳幼苗根系的空间分布特征

3.3.1 扎根深度和水平根幅分布 扎根深度和根幅分别反映植物根系在垂直和水平空间上获取资源能力的强弱^[16]。如图 3, I 显示,不同灌溉量下柽柳幼苗根幅在土层中的分布具有明显差异。其中,各

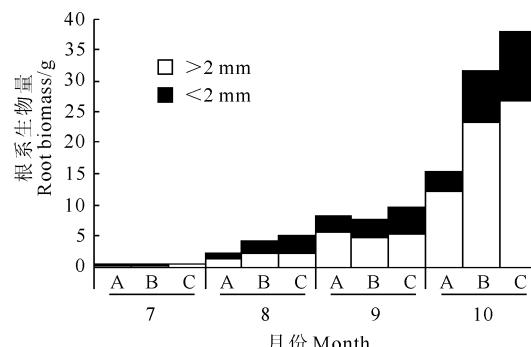
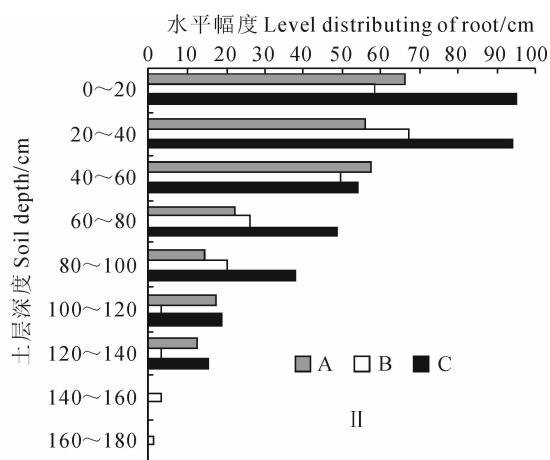


图 2 不同灌溉量下柽柳幼苗根系生物量的变化

Fig. 2 Root biomass of *T. ramosissima* seedlings under different irrigation treatments



层根系在处理 C($0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)条件下水平拓展空间最大,有助于尽可能多地获取水平方向上的资源。图 3, II 显示,随着灌溉量的增加,各月份柽柳幼苗的扎根深度会逐步降低。其中,在 10 月底,处理 A ($0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)下柽柳最大扎根深度可达 2.1 m 左右,而灌溉量较大时,满足了植物对水分的需求,根系向下层伸展的“积极性”降低,同期处理 C($0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)下根深仅为 1.5 m,这对植物利用深层土壤的水分和养分不利。但处理 C($0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)下柽柳幼苗水平根幅的拓展则有效弥补这种不足。

3.3.2 根系生物量的垂直分布 从柽柳幼苗根系生物量 10 月份的垂直分布特征上看(图 4),粗根($>2 \text{ mm}$)和细根($<2 \text{ mm}$)均随土壤深度的增加而逐层递减。通过曲线模拟得出的方程可以看出,粗根生物量在土壤中的垂直变化较符合指数形式,而细根生物量基本上为线性递减。不同灌溉处理间,柽柳幼苗根系的这种垂直变化有显著差异,处理 C 下的各层生物量总体上在 3 种处理中最大,而处理 A 则最小。总体上根系生物量随土壤深度增加均呈现“倒金字塔”式的分布,0~40 cm 土壤深度的根系生物量占总重的比例在处理 A、B、C 下分别为 67.0%、75.1% 和 77.2%。这说明灌溉量越大,根

系生物量向表层集中的趋势越明显。

3.3.3 根长密度和比根长的垂直分布 根长密度和比根长决定植物吸收养分和水分的能力,在反映根系生理生态功能方面具有很重要的作用^[17]。如图 5 所示,与根系生物量不同,柽柳幼苗的根系直径越小,比根长越大,根长密度越高;粗根和细根的根长密度均随着土层加深显著减小,与生物量垂直分布规律基本一致;粗根和细根的比根长主要分布在 0~40 cm 的土壤表层,分别占 60.6% 和 41.3%。而且灌溉量越大,这种表层的集中趋势越明显。

另外,在一定土壤深度,柽柳幼苗粗根的比根长随土壤深度的增加而呈现比较明显的逐步增大趋势(图 5)。粗根主要起到支撑和运输作用,不同土壤深度粗根的功能可能有所不同。柽柳地上部分较为高大,0~40 cm 土壤表层中的根系一个很重要的作用就是支撑防倒伏,因此土壤表层中柽柳单位重量根系长度减少,直径增大,而随着根系下扎,这种作用逐渐减弱,直径减小,更多是通过增加根长来运输水分和养分。其中,处理 A 下各层粗根的比根长最大,说明其根系细长但生物量积累有限。而各处理下柽柳幼苗细根的比根长没有明显的变化规律,这可能是因为各层间的细根均主要是吸收水分和养分,并

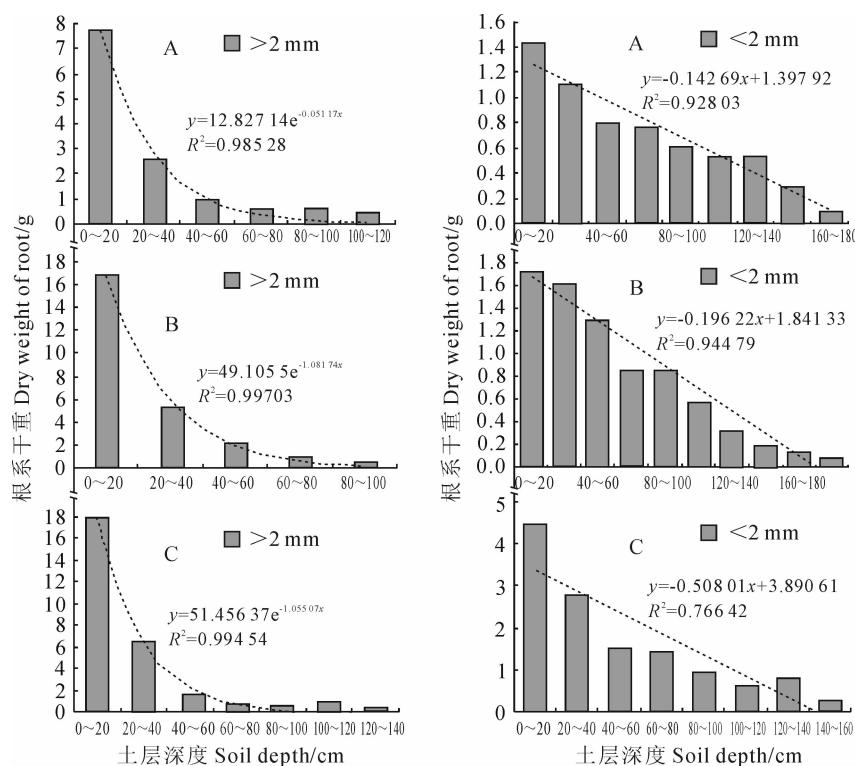


图 4 不同灌溉量下柽柳幼苗根系生物量的垂直分布(10 月份)

Fig. 4 The vertical distribution of root biomass of *T. ramosissima* seedlings under different irrigation treatments (October)

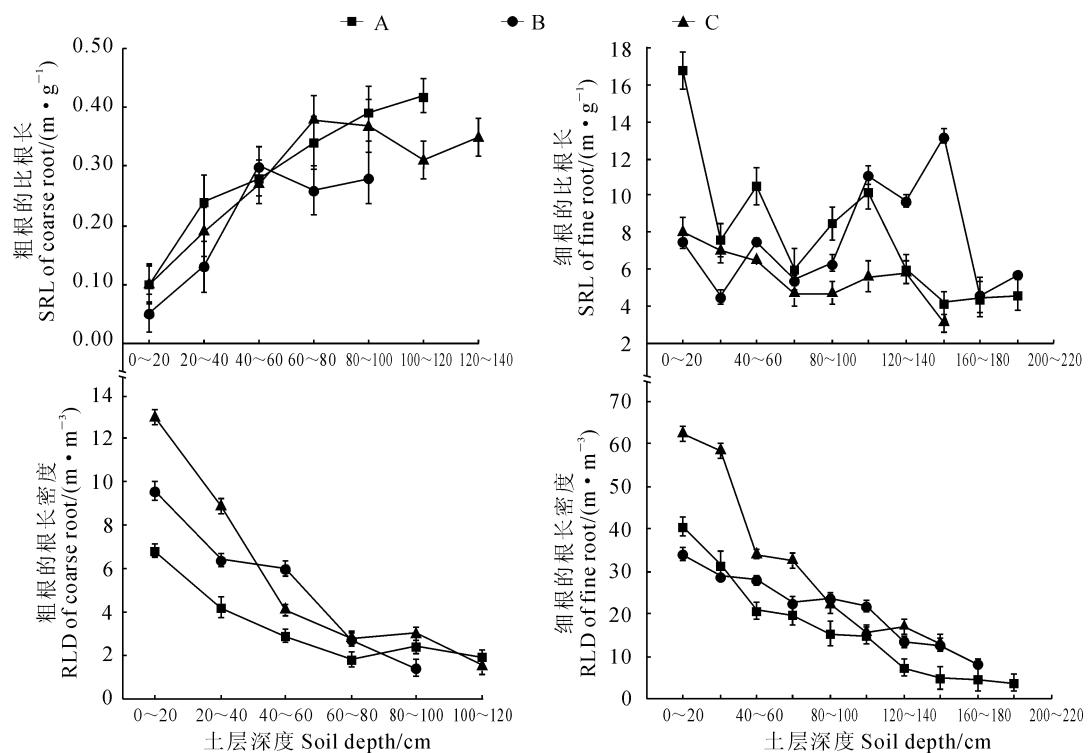


图5 不同灌溉量下柽柳幼苗根系的根长密度和比根长(10月份)

Fig. 5 Root length density distribution(RLD) and specific root length (SRL) of *T. ramosissima* seedlings under different irrigation treatments(October)

无功能上的差异,细根比根长波动主要与各层土壤微观环境有关^[18]。处理A下细根比根长较大,而处理C最小,说明干旱胁迫使得细根变得更“细长”,而水分条件充足有利于细根扩大根系的表面积。

4 结论与讨论

在极端干旱区,植被生存和生长面临的最大难题就是如何获得和高效利用有限的水资源^[19]。根系是植物水分和养分吸收的主要器官,在水分受限的生态系统,水分和养分的可利用性又决定于植物所处的环境条件、根系大小、形态及根系竞争力^[20]。

植物根幅说明植物根系的水平生长和扩展状况,反映植物根系在水平方向上获取资源能力的大小^[8]。已有研究表明梭梭幼苗根系水平根幅在不同生长阶段水平根幅扩展的速度不同,水平根幅的扩展速度为地上冠幅2~5倍^[21];生长在毛乌素沙地的沙柳,水平根幅为冠幅3倍左右^[22]。在本研究中,不同灌溉量下柽柳幼苗根幅在土层中的分布具有明显差异,各层根系在 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$ 灌溉量下水平拓展空间最大,从分布特征来看,多枝柽柳幼苗根幅随土壤深度的增加呈减少趋势,而增加灌溉量会导致柽柳幼苗根系分布的浅表化。

根系重量是研究根系的重要指标之一^[16],本研究中,随着灌溉量的减少,柽柳幼苗根系生物量积累逐步下降,但扎根深度却逐步增加,这符合荒漠区植物的生长规律^[23-28],说明轻度水分胁迫会促使根系下扎,可以有效利用深层土壤水,甚至在一定程度上促使根系及早接触到地下水^[3]。但无灌溉条件下,柽柳幼苗根系10月底生物量积累不足,即使在水分条件较好时(40%),其细根生物量有明显减少,说明了干旱胁迫虽然不会对柽柳幼苗的生存造成威胁,但在生长初期已对幼苗的生长发育造成了不可逆的损伤,限制了其潜在生产力。

根系消耗的光合产物主要用于细根建成,细根单位重量的根长(比根长)和单位体积上的根长(根长密度)决定根系吸收养分和水分的能力,在反映根系生理生态功能方面可能比生物量更有意义^[18]。本研究表明,柽柳幼苗细根生物量平均仅占总根量的25%左右,但比根长和根长密度却最高,粗根生物量比重大,但比根长和根长密度却最低。这种根长和生物量不对称的比例关系,反映了粗根和细根功能上的差异^[29]。郭大立等报道,根系动态主要是细根动态,维持细根具有较高的比根长和根长密度,这对其行使吸收功能有利^[30]。本研究中灌溉量越

大,柽柳幼苗的细根生物量和根长密度越大,说明土壤水分条件的改善,促使柽柳将更多的资源投入到细根的生长上。

土壤资源异质性是导致根系空间分布异质性的主要原因,根系适应土壤空间异质性的基本策略就是调整生物量和根长密度^[31]。柽柳幼苗根系生物量和根长密度大量集中在表层,而且随着灌溉的增加,这种集中趋势愈加明显。国内外大量相关研究已表明,在0~20 cm的土层中,根系的分布较为集中^[32-35],有人认为根系吸收机制是在比较肥沃的土层中尽可能投入较多的碳水化合物,扩大根系的面积,尽可能多地吸收养分和水分^[36],这与本研究结果一致。

与根系生物量和根长密度不同,粗根的比根长随土壤深度逐步增大,说明在表层柽柳根系的直径较粗从而使相同长度的根重增加,比根长减小,其原因可能是柽柳地上部分较为发达,表层粗根主要起到支撑作用,因而直径较粗,越往下扎根,粗根的直径越小,对整个植株起到的支撑作用就越小,这符合

植物生长的常理。而柽柳细根比根长随土壤深度变化的规律并不明显,可能是因为细根的生理生态过程受土壤水分、养分和根际微生物的影响较大,由于不同土层的水分和养分的微小差异可能就会导致细根随土壤的异质性表现出巨大的结构和功能上的可塑性^[18]。郭大立等分析多年根系动态数据发现,土壤水分、养分和真菌等资源有效性对细根生产量和周转率都有明显影响^[37],这与本研究结果一致。

植物的生长行为是受多种环境因子作用后的综合表现。在塔克拉玛干沙漠极端环境条件下,水分是植物生长发育的主要限制因子^[38]。研究表明荒漠区植物群落植被潜在生产力非常高甚至与湿润地区植被类型处于相同数量级,而限制当地植被生产力形成的最大因素就是水^[39]。干旱胁迫不仅对柽柳幼苗生长发育产生不利影响,严重的还可能导致死亡;而过量灌溉也会对幼苗根系生长产生抑制^[16]。因此,确立合理的灌溉制度以确保柽柳正常生长和分布,对于揭示根系与土壤环境的动态作用机制,完善荒漠植被生态恢复都具有积极意义。

参考文献:

- [1] XIAO CH SH(肖春生),XIAO H L(肖洪浪),SI J H(司建华),et al. Growth characteristics of *Tamarix ramosissima* in Arid Regions of China[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报),2005,25(5):1 012—1 016(in Chinese).
- [2] LIU Z Q(刘自强),WU SH L(武胜利),LI ZH ZH(李忠志),et al. A study on vegetation character and ecology tragedry of Northwest edgein Taklamkan Desert[J]. *Journal of Xinjiang Normal University*(Nat. Sci. Edi.) (新疆师范大学学报·自然科学版),2004,23(3):71—75(in Chinese).
- [3] 张希明, MICHAEL R. 塔克拉玛干沙漠边缘植被可持续管理的生态学基础[M]. 北京:科学出版社,2006:3—8.
- [4] LI X M(李小明),ZHANG X M(张希明). Water condition and restoration of natural vegetation in the southern margin of the Taklimakan Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报),2003,23(7):1 449—1 453(in Chinese).
- [5] WANG Q(王卿),WANG CH H(汪承焕),HUANG SH F(黄沈发),et al. Salt marsh plant community research progress:distribution succession and its influencing factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*(生态环境学报),2012,21(3):375—388(in Chinese).
- [6] BRUELHEIDE H,JANDT U,GRIES D,et al. Vegetation changes of a river oasis at the southern rim of the Taklamakan Desert in China between 1956 and 2000[J]. *Phytocoenologia*,2003,33:801—818.
- [7] YIN CH H(尹传华),FENG G(冯固),TIAN CH Y(田长彦),et al. Variations of the fertile Island effects beneath tamarisk in northern Taklamakan Desert, Northwestern China and its implication to desertification process[J]. *Journal of Beijing Forestry University*(北京林业大学学报),2008,30(1):53—58(in Chinese).
- [8] LIU ZH(刘镇),ZENG F J(曾凡江),AN G X(安桂香),et al. Influence of irrigation amounts on seedling growth and biomass allocation of *Calligonum caput-medusae* at the southern fringe of the Taklimakan Desert[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠),2012,32(6):1 655—1 661(in Chinese).
- [9] DUAN ZH H(段争虎),HE X D(何兴东),ZHAO A G(赵爱国),et al. Preliminary studies on irrigation system for sand-fixing plants in Takelamagan Deser[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*(干旱区资源与环境),2001,15(4):76—81(in Chinese).
- [10] MA D H(马东辉),ZHAO CH X(赵长星),WANG Y F(王月福),et al. Effects of nitrogen fertilizer rate and postanthesis soil water content on photosynthetic characteristics in flag leaves and yield of wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报),2008,28(10):4 896—4 901 (in Chinese).
- [11] HE ZH Q(贺忠群),ZOU ZH R(邹志荣),CHEN X H(陈小红). Study on water-saving irrigation index for greenhouse cucumber[J]. *Journal of Northwest A&F University*(Nat. Sci. Edi.) (西北农林科技大学学报·自然科学版),2003,31(3):77—80(in Chinese).
- [12] ENTZ,M H K,GROSS D. B,et al. Root growth and soil-water extraction by winter and spring wheat[J]. *Canadian Journal of Plant Science*,1992,72:1 109—1 120.
- [13] WEI H(魏虹),LIN K(林魁),LI F M(李凤民),et al. Effects of limited irrigation on the root development of spring wheat in a semi-arid region[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报),2000,24(1):106—110(in Chinese).

- [14] LIU SH(刘殊),LIAO J S(廖镜思). Effects of water stress on photosynthesis in Longyan[J]. *Journal of Fruit Science*(果树科学), 1997, **14**(4):244—247(in Chinese).
- [15] GUO D L,LI H,MITCHELL R L,*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.
- [16] ZHANG X L(张晓蕾),ZENG F J(曾凡江),LIU B(刘波),*et al*. Effects of different soil moisture treatments on the photosynthesis and dry matter accumulation of *Alhagi sparsifolia* seedlings[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究), 2010, **27**(4):649—655(in Chinese).
- [17] ZHANG D L,XU X X,HU W,*et al*. Spatial distribution of fine roots of a *Robinia pseudoacacia* plantation in Yangou watershed in the hilly region of the loess plateau[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, **47**(11):31—36.
- [18] HE J SH(贺金生),WANG ZH Q(王政权),FANG J Y(方精云). Underground ecology under global changes: question and expectation [J]. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), 2004, **13**(49):1 226—1 233(in Chinese).
- [19] MA X D(马晓东),ZHU CH G(朱成刚),LI W H(李卫红). Response of root morphology and biomass of *Tamarix ramosissima* seedlings to different water irrigations[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2012, **36**(10):1 024—1 032(in Chinese).
- [20] WANG ZH Q(王政权),GUO D L(郭大立). Root ecology[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2008, **32**(6):1 213—1 216(in Chinese).
- [21] WEI J(魏疆),ZHANG X M(张希明),SHAN L SH(单立山),*et al*. Seedling growth dynamic of *Haloxylon ammodendron* and its adaptation strategy to habitat condition in hinter land of desert[J]. *Science in China (Series D): Earth Science*, 2007, **36**(S II):107—114(in Chinese).
- [22] YANG X L(杨小林),ZHANG X M(张希明),LI Y L(李义玲),*et al*. Analysis of root architecture and root adaptive strategy in the Taklimakan Desert Area of China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2008, **32**(6):1 268—1 276(in Chinese).
- [23] ZHANG H(张宏). Biomass dynamics and energy efficiency of rhizotaxy of the grass+forbs steppe in Mu Us Sand land[J]. *Journal of Desert Research*(中国沙漠), 1999, **19**(2):151—155(in Chinese).
- [24] SHAN L SH(单立山),ZHANG X M(张希明),HUA Y H(花永辉),*et al*. Response of root distribution of *Haloxylon ammodendron* seedlings to irrigation amounts in the Taklimakan Desert[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2007, **31**(5):769—776(in Chinese).
- [25] SHAN L SH(单立山),ZHANG X M(张希明),CHAI ZH P(柴仲平),*et al*. Response of the distribution of roots of *Tamarix ramosissima* seedlings to irrigation with different volumes[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究), 2007, **24**(2):213—218(in Chinese).
- [26] LI SH Y(李生宇),LI H ZH(李红忠),LEI J Q(雷加强),*et al*. Underground biomass of nursery grown plants irrigated with highly mineralized water in the Taklimakan Desert[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2005, **25**(5):999—1 006(in Chinese).
- [27] ZENG F J(曾凡江),LIU B(刘波),HE J X(贺俊霞),*et al*. Effect of irrigation on nitrogen characteristics of *Alhagi sparsifolia* seedling[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2010, **30**(8):2 118—2 127(in Chinese).
- [28] VONLANTHEN B,ZHANG X M,BRUELHEIDE H. On the run for water root growth of two phreatophytes in the Taklamakan Desert [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, **74**:1 604—1 615.
- [29] DU Y X(杜有新),PAN G X(潘根兴),LI L Q(李恋卿),*et al*. Fine root biomass and its nutrient storage in karst ecosystems under different vegetations in Central Guizhou China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2010, **21**(8):1 926—1 932(in Chinese).
- [30] GUO D L,MITCHELL R J,HEBDRICKS 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] AUNG I H. Root-shoot relationships: The plant root and its environment. Charlottesville: University press of Virginia, 1974:29—52.
- [32] LI P(李鹏),LI ZH B(李占斌),TANTAI ZH(澹台湛). Dynamic distribution characters of herbaceous vegetation root systems in abandoned grasslands of Loess[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2005, **16**(5):849—853(in Chinese).
- [33] ZHANG Y Q(张宇清),ZHU Q K(朱清科),QI SH(齐实),*et al*. Vertical distribution characteristics of root system of several shrub species on terrace banks[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, **28**(2):34—38(in Chinese).
- [34] BAITULIN I O,MERI · ISLAM. Ecological plasticity of roots system[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究), 1995, **12**(2):24—26(in Chinese).
- [35] LIU Y(刘莹),GAI J Y(盖钧益),LÜ H N(吕慧能). Advances of relationship between crop root morphology and tolerance to antibiotic stress[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*(植物遗传资源学报), 2003, **4**(3):265—269(in Chinese).
- [36] GUO D L,MITCHELL R J,WITHINGTON J M,*et al*. Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: root branch order predominates[J]. *Journal of Ecology*, 2008, **96**(4):737—745.
- [37] GUO D L,ZHANG J,YUEN S T,*et al*. Reduced expression of EphB2 that parallels invasion and metastasis in colorectal tumours[J]. *Carcinogenesis*, 2006, **27**(3):454—464.
- [38] XIE T T(解婷婷),ZHANG X X(张希明),SHAN L SH(单立山),*et al*. Effect of irrigation volume on the water physiological characters and growth of *Tamarix ramosissima* shelter belts along the Tarim Desert Highway[J]. *Arid Zone Research*(干旱区研究), 2008, **25**(6):802—807(in Chinese).
- [39] ZENG F J,BLEBY T M,LANDMAN P A,*et al*. Water and nutrient dynamics in surface roots and soils are not modified by shortterm flooding of phreatophytic plants in a hyperarid desert[J]. *Plant and Soil*, 2006, **279**:129—139.