塔克拉玛干沙漠腹地梭梭幼苗根系分布特征 对不同灌溉量的响应

单立山^{1,2} 张希明^{1*} 花永辉³ 魏 疆^{1,2} 闫海龙^{1,2} 解婷婷^{1,2}

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049) (3 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049)

摘 要 在塔克拉玛干沙漠腹地, 采用分层分段挖掘法对不同灌溉量条件下(每株每次灌水 35、24.5 和 14 kg)梭梭(*Haloxylon ammodendron*)幼苗根系的分布特征进行了研究。结果表明: 1)随着灌溉量的减少, 梭梭幼苗根系生物量的分布格局有向深层发展的趋势, 在不同灌溉量条件下地下垂直各层生物量与土壤垂直深度呈显著的负对数关系; 2)各灌溉量梭梭幼苗的最大水平根长为垂直根长的 2 倍, 但不同灌溉量根系生物量的水平分布趋势一致; 3)吸收根生物量的垂直分布与土壤含水量的垂直变化基本一致, 均呈“单峰型”曲线, 但灌溉量不同, 吸收根生物量峰值在土壤中出现的位置也不同, 随着灌溉量的减少, 吸收根集中分布区有向深层发展的趋势; 4)根长、根表面积和根体积随着土壤深度的增加均呈“单峰型”曲线, 灌溉量愈小, 根长、根表面积和根体积的峰值愈位于土壤的深层; 5)根冠比和垂直根深与株高之比随着灌溉量的减少而呈增加的趋势。

关键词 根系 根表面积 地下生物量 根冠比

RESPONSE OF ROOT DISTRIBUTION OF *HALOXYLON AMMODENDRON* SEEDLINGS TO IRRIGATION AMOUNTS IN THE TAKLIMAKAN DESERT, CHINA

SHAN Li-Shan^{1,2}, ZHANG Xi-Ming^{1*}, HUA Yong-Hui³, WEI Jiang^{1,2}, YAN Hai-Long^{1,2}, and XIE Ting-Ting^{1,2}

¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China, ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China, and ³Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China

Abstract Aims As a primary limiting factor affecting survival and growth of plants, moisture has important effects on above- and below-ground morphological characteristics. We studied root distribution characteristics in the Tarim Desert Highway Protection Forest to provide suggestions for water management.

Methods We excavated soil to study root distribution in *Haloxylon ammodendron* seedlings grown with different amounts of irrigation (35, 24.5 and 14 kg·ind. plant⁻¹·once⁻¹) in the Taklimakan Desert.

Important findings With less irrigation, the distribution of root biomass shifted to greater depth. Under-ground biomass had a significantly negative logarithmic relationship with soil depth under different irrigation amounts. Maximum horizontal spread of roots was twice that of vertical root spread, and horizontal distribution of root biomass was consistent under all irrigation amounts. The vertical distribution of absorptive roots was nearly consistent with vertical changes of soil moisture; all had a unimodal curve, but peak values of absorptive roots biomass were in different soil layers with different irrigation amounts. With smaller amounts of irrigation, absorptive roots were concentrated in deeper soil layers. Root length, root surface area and root volume all exhibited a unimodal curve under different irrigation amounts; the less irrigation, the deeper the peak values. Root-shoot ratios and proportion of vertical root depth and plant height increased as irrigation amounts decreased.

Key words root system, root surface area, underground biomass, root-shoot ratio

水分是影响植物生存和生长发育的主要限制因子, 水分变化对植物体内的水分平衡和植物的形态建成具有重要影响。在干旱地区, 多数植物具有发达的根系, 尽管在深层土壤中仅有很少比例的根系

存在,但它们在植物生命活动的维持和逆境适应等方面发挥着非常重要的作用(Jackson *et al.*, 1996; Gale & Grigal, 1987)。前苏联学者对伊犁—阿拉套乌山麓地带湿润和干旱条件下同种植物的根系进行过对比研究,结果表明:生长在潮湿环境中的植物根系分支状况较差,许多植物的根系分支仅有 2~3 级,而在干旱的南部山麓地带,同种植物根系的分支可达到 5 级(巴吐宁 10 和麦来·斯拉木, 1995)。一些研究结果显示,轻度水分胁迫条件会促使根系下扎(杨培岭等, 1993; 张爱良和苗果园, 1997)。这些研究结果说明:在干旱地区水分对根系构型和分布具有重要的调控作用。

随着塔克拉玛干沙漠公路防护林工程的完成,沙漠公路防护林的可持续问题受到极大关注。有学者提出若干年后在沙漠公路部分区段改变管理方式使防护林植物直接利用地下水的可行性。根据盛晋华等(2004)和李钢铁等(1995)的研究,天然分布的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)在内蒙古是利用地下水维持其生命活动的。塔克拉玛干沙漠腹地没有天然分布的梭梭,人工梭梭防护林一直依靠滴灌来满足其对水分的需求。以节约水资源和维护防护林的稳定为出发点,我们于 2005 年在塔克拉玛干沙漠腹地布设了不同灌溉量条件下梭梭幼苗根系研究试验。

梭梭为藜科多年生小乔木,有时呈灌木状,是塔里木沙漠公路防护林主要的造林物种。近年来,一些学者对不同水分管理条件下梭梭的生理生态特性进行了研究,但工作主要集中在地上部分的抗旱生理方面(吴琦和张希明, 2005; 马全林等, 2003; 李银芳, 1992)。由于干旱的环境条件,梭梭形成了对生境的特殊适应方式,疏松的沙土和干旱环境使其根系分布范围十分广阔,挖掘工作困难。迄今为止,有关梭梭根系分布特征对水分变化响应的研究报道仍较少。本研究以塔克拉玛干沙漠腹地独特的自然条件为背景,调查了不同灌溉量条件下梭梭幼苗根系及其冠层形态结构,探讨了梭梭个体形态特征对水分条件变化的响应,以期对塔里木沙漠公路防护林水分管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区自然条件

试验样地位于中国科学院新疆生态与地理研究所塔中沙漠植物园东南 8 km 处的沙丘低地。此地年平均气温 12.4 °C,一年中最热月份为 7 月,7 月平

均气温 28.2 °C;最冷月份为 12 月,12 月平均气温 -8.1 °C;极端最高气温 45.6 °C,极端最低气温 -22.2 °C,全年 ≥ 10 °C 的积温 4 621.8 °C。无霜期 283 d,年日照时数 2 571.3 h,年降水量 36.6 mm。平均相对湿度 29.4%,潜在蒸发量为 3 638.6 mm。4~8 月为风季,平均风速为 3.2 m·s⁻¹,期间大风频繁且风热同期,浮尘扬沙天气也十分频繁。土壤特征随地貌不同而有所差异,绝大部分为流动的风沙土,盐分含量为 1.26~1.63 g·kg⁻¹,在下层偶尔有亚粘土(一般只有 20~60 cm 厚)夹杂在风沙土中间。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 样地设计和管理

2005 年 3 月,在试验样地定植了梭梭一年生实生苗,株行距 4 m × 4 m。灌溉水为当地的地下咸水。灌溉方式为滴灌。灌溉周期按照塔里木沙漠公路防护林现行的灌溉周期,3~8 月为 10 d,9~11 月为 15 d。为防止梭梭被沙埋和沙割,在其两行苗木之间设置了机械沙障。采用 3 种灌溉量形成 3 个处理:处理 1 以塔里木沙漠公路现行的灌溉量为准,为每株每次灌水 35 kg;处理 2 和处理 3 的灌溉量分别为每株每次灌水 24.5 kg 和 14 kg。定植一个月后,对不同灌溉量条件下植株的成活率进行了统计,成活率均达到 90% 左右。

1.2.2 试验方法

2005 年 10 月底,采用分层分段挖掘法对梭梭幼苗根系形态结构特征进行了调查。在各灌溉量试验地随机选取 4 株苗木,对所选植株采用分层分段法进行根系挖掘,挖掘时以植株根茎为圆心,水平方向 30 cm 为一段,自地表向下每 20 cm 为一层,然后分层分段取土。用 2 mm 筛孔的筛子筛出各层各段的根系,直到水平和垂直范围没有根为止。挖掘根系之前,在所挖掘的植株附近利用土钻 20 cm 为一层分层取土样,测定其土壤含水量。同时对所挖掘植株进行地上生长指标(株高、冠幅、基径和当年新枝长)的测定。然后在实验室内对取回的各层各段根样进行冲洗,待根系恢复原状后,按照直径 ≤ 1 mm 和 > 1 mm 分类放置。对分类放置的根系随机选取 5 段测定直径,取其平均值作为该层该段根系的平均直径,然后用量筒溢水法测出各层各段根系的体积,用公式 $L = 4V/\pi d^2$ 和 $S = 4V/d$ 求出根长(L)和根系表面积(S)。最后,将地下各层各段根系与植株地上部分放入干燥箱,在 105 °C 下烘干至恒重后称重。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉量条件下根系生物量的垂直分布

由图 1~3 可知 ,各灌溉量梭梭幼苗根系生物量

图 1 处理 1 地下各层生物量垂直分布
Fig.1 Vertical distribution of underground biomass in each layer for treatment one

图 2 处理 2 地下各层生物量垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of underground biomass in each layer for treatment two

图 3 处理 3 地下各层生物量垂直分布
Fig.3 Vertical distribution of underground biomass in each layer for treatment three

在土壤中的垂直分布趋势基本一致 ,即随着土壤深度的增加 ,根系生物量逐渐减少 ,但随着灌溉量的减少 ,最深层次根系生物量有增加的趋势。对垂直采样层深度与相应层根系生物量进行了相关分析 ,结果表明各灌溉量两两均呈负对数关系(表 1)。处理 3 在 60~80 cm 和 80~100 cm 深处的生物量分别为 29.77 g 和 8.36 g ,占该灌溉量总生物量的 21.41% 和 6.01% ;而处理 2 在 60~80 cm 和 80~100 cm 深处的生物量分别仅为 3.60 g 和 0.28 g ,只占该灌溉量总生物量的 3.10% 和 0.24% ;处理 1 在这两层的生物量分别也仅为 5.54 g 和 0.00 g ,只占该灌溉量总生物量的 5.45% 和 0.00%。方差分析结果表明 ,处理 3 与处理 1 和 处理 2 的生物量 ,在 60~80 cm 和 80~100 cm 两层中相同层之间差异显著 ($p < 0.05$, $df = 3$) ;而各灌溉量在 0~60 cm 三层中相同层之间地下生物量差异并不显著 ($p < 0.05$, $df = 3$)。

表 1 各灌溉量地下生物量的垂直分布曲线方程——根系层深度与层生物量的关系

Table 1 Vertical distribution curve equation of underground biomass under different irrigation amounts (the relationships between depth and biomass of sampling layer)

处理 Treatment	拟合方程 Fitting equation	决定系数 Determination coefficient
No. 1	$Y = -25.944\ln(X) + 122.86$	$R^2 = 0.9112$
No. 2	$Y = -33.613\ln(X) + 156.12$	$R^2 = 0.9280$
No. 3	$Y = -16.65\ln(X) + 93.632$	$R^2 = 0.7116$

Y 为根系层生物量 (g) , X 为根系层深度 (cm) Y and X represent biomass (g) and depth (cm) of root-sampled layer , respectively

2.2 不同灌溉量条件下根系生物量的水平分布

由图 4 可以看出 ,梭梭幼苗在不同灌溉量条件下水平各段根系生物量随距植株基径距离的增加而逐渐减少 ,但在 60~90 cm 处生物量稍有增加 ,这是因为 60~90 cm 处根密度虽比 30~60 cm 处稍小 ,但其所挖掘的土环体积为 30~60 cm 处土环体积的 2 倍 ,使得根系生物量在该处稍有增加。水平采样各段与相应段地下生物量相关分析表明 ,各灌溉量两两相关系数差异不大 ,分别为 -0.960 7、-0.967 0 和 -0.960 2 ,即各灌溉量水平根系生物量分布趋势一致。对水平根系生物量进行了方差分析 ,结果表明 :各灌溉量相同水平段地下生物量无显著差异 ($p < 0.05$, $df = 3$) ;不同灌溉量条件下水平根系总生物量也无显著差异 ($p < 0.05$, $df = 3$)。从水平根系生物量累计百分比分析 ,各灌溉量以植株基径为圆心 90 cm 为半径的圆内生物量均占总生物量的 80%

左右,但不同灌溉量条件下最大水平根长有所不同,处理3最大水平根长为210 cm,处理2和处理1最大水平根长为180 cm。

图4 各灌溉量地下生物量水平分布
Fig.4 Horizontal distribution of underground biomass under different irrigation amounts

2.3 不同灌溉量条件下吸收根生物量的垂直分布与土壤水分的关系

从图5~7可以看出,土壤含水量随土壤深度的增加呈“单峰型”曲线,但图7显示处理3出现了2个峰值。经方差分析,处理3的土壤含水量显著低于处理1和处理2 ($p < 0.05, df = 3$),而处理1和处理2之间的土壤含水量无显著差异 ($p < 0.05, df = 3$)。对各灌溉量同层土壤含水量进行方差分析,结果表明:自地表向下20 cm各灌溉量之间土壤含水量无显著差异 ($p < 0.05, df = 3$),可能是由于在塔克拉玛干沙漠腹地极端干旱的环境条件下,沙层表面强烈蒸发使各灌溉量在自地表向下20 cm均为干沙层,所以不同灌溉量之间土壤含水量无显著差异;在土壤垂直层中,60~80 cm和80~100 cm两层中相同层之间各灌溉量土壤含水量也无显著差异 ($p < 0.05, df = 3$),可能是因为滴灌水没有渗透到该层,而在相同立地条件下深层土壤含水量变化不大的缘故,但在样地土壤垂直层20~40 cm深处处理3的土壤含水量显著低于处理1 ($p < 0.05, df = 3$);在土壤垂直层40~60 cm深处处理3的土壤含水量也显著低于处理1和处理2 ($p < 0.05, df = 3$)。

图5~7同时显示,吸收根生物量的垂直分布与土壤含水量的垂直变化趋势基本一致,均为“单峰型”曲线,但灌溉量不同,吸收根生物量峰值在土壤中出现的深度也不同,处理1的峰值为19.45 g,出现在0~20 cm深处;处理2的峰值为31.26 g,出现在20~40 cm深处;处理3的峰值为21.17 g,出现在

60~80 cm深处。由此可见,随着灌溉量的减少,吸收根集中分布层有向深层发展的趋势,但各灌溉量总根量和输导根量均随深度的增加而逐渐减小。

图5 处理1根系分布与土壤水分关系
Fig.5 Relationship between soil moisture and root distribution of treatment one

图6 处理2根系分布与土壤水分关系
Fig.6 Relationship between soil moisture and root distribution of treatment two

2.4 不同灌溉量条件下根体积、根长和根表面积的变化

从图8~10可以看出,不同灌溉量条件下梭梭幼苗根体积、根长和根表面积随土层深度的增加均呈“单峰型”曲线,但各灌溉量根体积、根长和根表面积的峰值出现在不同的土壤深度,表现为:处理1的根体积和根表面积峰值出现在20~40 cm深处,但最大根长出现在0~20 cm深处;处理2的根体

积、根长和根表面积峰值均出现在 20 ~ 40 cm 深处；处理 3 的根体积、根长和根表面积峰值均出现在 60 ~ 80 cm 深处。图 8 ~ 10 同时显示，处理 3 在 0 ~ 60 cm 深处相同层的根体积、根长和根表面积均比处理 1 和处理 2 的小，而在 60 ~ 100 cm 深处相同层的根体积、根长和根表面积反而比处理 1 和处理 2 的大。对各层各指标的百分比进行分析表明：处理 3 在 0 ~ 60 cm 深处的根体积、根长和根表面积分别只为 62.38%、62.39% 和 61.17%，而处理 1 在 0 ~ 60 cm 深处的根体积、根长和根表面积分别高达 92.51%、90.50% 和 91.78%；处理 2 在 0 ~ 60 cm 深处的根体积、根长和根表面积也分别高达 95.63%、94.76% 和 95.31%。方差分析表明，0 ~ 60 cm 深处

图 7 处理 3 根系分布与土壤水分关系
Fig.7 Relationship between soil moisture and root distribution of treatment three

图 8 各灌溉量根体积垂直分布
Fig.8 Vertical distribution of root volume under different irrigation amounts

图 9 各灌溉量根长垂直分布
Fig.9 Vertical distribution of root length under different irrigation amounts

图 10 各灌溉量根表面积垂直分布
Fig.10 Vertical distribution of root surface area under different irrigation amounts

各灌溉量根体积、根长和根表面积无差异 ($p < 0.05$, $df = 3$) 但在 60 ~ 100 cm 深处 处理 3 的根体积、根长和根表面积显著大于处理 1 和处理 2 ($p < 0.05$, $df = 3$)。2.5 地下与地上生长指标之比及地下生物量回归预测模型

从表 2 可以看出，随着灌溉量的减少，根冠比和垂直根深与株高之比都有增加的趋势；处理 2 和处理 3 的根幅与冠幅之比比处理 1 的大。地上生长指标与地下生物量相关分析表明，滴灌条件下梭梭幼苗地下生物量与地上生物量和基径呈极显著相关，而与冠幅显著相关。对与地下生物量相关显著的地上生长指标和地下生物量进行了回归分析，结果显示：只有基径的偏回归系数显著 ($p < 0.05$)，最优回归预测模型为 $Y = 10.76X - 21.93$, $r = 0.806$ (Y 为地下生物量, X 为基径)。

表 2 各灌溉量地下/地上生长指标之比(平均值 ± 标准误差)
Table 2 Proportion between under- and aboveground growth indexes under different irrigation amounts (Mean ± SE)

处理 Treatment	根冠比 Root-shoot ratio	根深/株高 Root depth /individual plant height	根幅/冠幅 Root spread range/crown diameter
No. 1	0.88 ± 0.11	0.95 ± 0.16	12.70 ± 1.54
No. 2	0.90 ± 0.12	1.06 ± 0.15	17.16 ± 3.41
No. 3	0.92 ± 0.20	1.37 ± 0.12	14.85 ± 3.61

3 讨 论

植物形态对生态因子变化响应的研究一直是人们关注的热点。在极端干旱的环境条件下,水分是植物生长发育的主要限制因子,水分的差异会导致植物形态结构的差异,这不仅表现在冠层结构上,而且表现在根系形态特征上。

3.1 不同灌溉量对梭梭幼苗根系垂直分布的影响

不同灌溉量条件下梭梭幼苗根系生物量的垂直分布随土壤深度的增加而呈逐渐减少的趋势,这符合植物根系垂直分布的普遍规律,与前人对其它植物根系生物量垂直分布的研究结果一致(李生宇等, 2005; 汪文卿等, 2003; 李鹏和赵忠, 2004; 白永飞, 1999; 张国盛等, 1999; 张宏, 1999)。但在塔克拉玛干沙漠腹地人工滴灌条件下,梭梭幼苗根系生物量在 0~60 cm 深处的土层中累计百分比达 86%,根系趋于表层化,这是人工滴灌条件下根系的向水性所致。不同灌溉量条件下梭梭幼苗根系的垂直采样层深度与层根系生物量均呈负对数关系,这与塔克拉玛干沙漠腹地不同立地条件下梭梭的研究结果一致(李生宇等, 2005)。方差分析表明:在 0~60 cm 深处的土层中各灌溉量相应层之间根系生物量无显著差异($p < 0.05$, $df = 3$),而在 60~100 cm 深处的土层中相应层之间处理 3 的根系生物量显著大于处理 1 和处理 2($p < 0.05$, $df = 3$),表明当灌溉量较大时,满足了植物对水分的需求,根系向下伸展的“积极性”降低,生物量主要集中在上层,根系占有的空间较小;当灌溉量较少时,植物为了获取更多的水分维持生长发育,其根系向下伸展得比较深,根系所占有的空间也较大,这与沙地柏(*Sabina vulgaris*)通过增加根系深度来补偿土壤水分的亏缺进而适应缺水环境的结果一致(何维明, 2000)。在降雨稀少的塔克拉玛干沙漠腹地,随着灌溉量的减少,梭梭幼苗为补偿土壤水分的亏缺,只有通过根系的伸长生长来维持其体内的水分平衡。

3.2 不同灌溉量对梭梭幼苗水平根系分布的影响

不同灌溉量条件下梭梭幼苗根系的水平分布范围(0~210 cm)为垂直分布范围(0~100 cm)的 2 倍,表明在人工滴灌条件下梭梭幼苗根系的水平生长发达,这与人工栽培黄柳(*Salix gordejewii*)根系的研究结果一致(任安芝等, 2001)。各灌溉量水平方向的各段根系生物量与其相应水平距离的相关系数接近,即不同灌溉量条件下梭梭幼苗根系的水平分布趋势一致。在人工滴灌的条件下,梭梭幼苗水平根系有迂回生长的现象,这是由于灌水后水分主要集中在植株附近,根系的向水性使其迂回生长,这与内蒙古阿拉善盟阿左旗吉兰泰地区天然梭梭根系迂回生长的现象相似,但该地区迂回生长可能主要是受降雨的影响(盛晋华等, 2004)。

3.3 不同灌溉量对梭梭幼苗根长、根表面积和根体积的影响

同一灌溉量条件下梭梭幼苗根长、根表面积和根体积的垂直变化趋势相似,而不同灌溉量条件下,其根长、根表面积和根体积的垂直分布状况不同,但均呈“单峰型”曲线,这与不同沙地的沙地柏根表面积的垂直分布呈“单峰型”曲线一致(何维明, 2000),而与内蒙古阿拉善地区白刺(*Nitraria tangutorum*)根体积、根长和根表面积的垂直分布随深度增加逐渐减少的趋势有所不同(孙祥和于卓, 1992)。这可能是由于在塔克拉玛干沙漠腹地极端干旱的条件下,土壤的强烈蒸发使表层 0~20 cm 一直为干沙层,无法满足根系对水分的需要,因此植物根系在该层分布极少,根长、根表面积和根体积的垂直分布均为“单峰型”曲线。但在不同灌溉量条件下其峰值在垂直土壤层中出现的位置不同,灌水量越少其峰值越位于土壤深层。各灌溉量上层(0~60 cm 深处)根长、根表面积和根体积差异不显著($p < 0.05$, $df = 3$),但下层(60~100 cm 深处)处理 3 的根长、根表面积和根体积显著大于处理 1 和处理 2($p < 0.05$, $df = 3$)。

3.4 土壤含水量垂直变化与梭梭幼苗吸收根分布的关系

根据根系功能划分,可以将根系划分为输导根和吸收根。对于草本和小灌木而言,直径 $> 1\text{ mm}$ 的根系为输导根,其主要作用是水分和养分的输导;直径 $\leq 1\text{ mm}$ 的根系为吸收根,主要进行水分和营养物质的吸收(赵爱芬等,1997)。塔克拉玛干沙漠腹地防护林土壤水分状况主要受到滴灌量、地表蒸发和根系吸水的影响,但因沙地结构松散、土壤毛细管吸收作用力弱、地表存在干沙层对沙地的物理蒸发形成了一定的阻碍作用,因此在人工滴灌条件下,沙地土壤水分状况主要受防护林吸水的影响;又因根系的向水性决定了植物根系与土壤水的关系,而吸收根是植物吸水的主要器官,所以吸收根系的分布格局与沙地土壤水分的分布状况密切相关。在塔克拉玛干沙漠腹地人工滴灌条件下,梭梭幼苗吸收根垂直分布格局与土壤含水量的变化格局基本一致,与沙地人工小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)吸收根与土壤水分均为“单峰型”曲线的研究结果吻合(阿拉木萨等,2003),但在塔克拉玛干沙漠腹地吸收根生物量的峰值随着灌溉量的减少而位于土壤的深层。

3.5 不同灌溉量对梭梭幼苗根冠比的影响

根冠比是在环境因素的作用下,植物通过体内许多基本变化和自我适应、自我调节过程最终表现出的综合指标(李韵珠等,1999),也是反应植物根系与地上部分生长协调的重要指标。一般认为,荒漠植物以其分布深广的根系从较大范围土层中吸收水分和养分来滋养地上部细小而稀疏的枝叶。在塔克拉玛干沙漠腹地人工灌溉条件下,梭梭幼苗随着灌溉量的减少,根冠比和垂直根深与株高之比都有增加的趋势,表明植物在轻度水分胁迫条件下,只有通过根系下扎或增加分枝来扩大自己的水分营养空间,满足植物需求,保持植物体内水分平衡以适应干旱的环境条件。

参 考 文 献

- Alamusa (阿拉木萨), Jiang DM (蒋德明), Pei TF (裴铁璠) (2003). Relationship between root system distribution and soil moisture of artificial *Caragana microphylla* vegetation in sandy land. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 17, 78–81. (in Chinese with English abstract)
- Baitulin IO (巴吐宁 IO), Meri·Islam (麦来·斯拉木) (1995). Ecological plasticity of roots system. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 12 (2), 24–26. (in Chinese)
- Bai YF (白永飞) (1999). Influence of seasonal distribution of precipitation on primary productivity of *Stipa krylovii* community. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 23, 155–160. (in Chinese with English abstract)
- Gale MR, Grigal DE (1987). Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forestry Research*, 17, 829–834.
- He WM (何维明) (2000). Distribution characteristics of *Sabina vulgaris* under different habitats. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 36(5), 17–21. (in Chinese with English abstract)
- Jackson RB, Canadell J, Mooney HA (1996). A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia*, 180, 389–411.
- Li GT (李钢铁), Zhang MZ (张密柱), Zhang BZ (张补在), Zou SY (邹受益) (1995). A study on biomass of *Haloxylon ammodendron* forest. *Journal of Inner Mongolia Forestry College* (内蒙古林业学院学报), 17, 35–43. (in Chinese with English abstract)
- Li P (李鹏), Zhao Z (赵忠) (2004). Vertical root distribution characteristics of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau in China. *Journal of Forestry Research* (林业研究), 15(4), 87–92.
- Li SY (李生宇), Li HZ (李红忠), Lei JQ (雷加强), Xu XW (徐新文), Li BW (李丙文), Zhou HW (周宏伟) (2005). Underground biomass of nursery grown plants irrigated with highly mineralized water in the Taklimakan Desert. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 25, 999–1006. (in Chinese with English abstract)
- Li YF (李银芳) (1992). Effects of different moisture habitats on water consumption of *Haloxylon ammodendron*. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 9(4), 45–50. (in Chinese with English abstract)
- Li YZ (李韵珠), Wang FX (王凤仙), Liu LH (刘来华) (1999). Use and management of soil water and nitrogen resources. I. Soil water and nitrogen conditions and root development. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 5, 206–213. (in Chinese with English abstract)
- Ma QL (马全林), Wang JH (王继和), Ji YF (纪永福) (2003). Photosynthesis-physiological characteristics of *Haloxylon ammodendron* under different soil moisture grades. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 23, 2120–2126. (in Chinese with English abstract)
- Ren AZ (任安芝), Gao YB (高玉葆), Wang JL (王金龙) (2001). Root distribution and canopy structure of *Salix gordejvii* in different sandy land habitats. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 21, 399–404. (in Chinese with English abstract)
- Sheng JH (盛晋华), Qiao YX (乔永祥), Liu HY (刘宏义), Zhai ZX (翟志席), Guo YH (郭玉海) (2004). A study on the root system of *Haloxylon ammodendron*. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 12, 91–94. (in Chinese with English abstract)
- Sun X (孙祥), Yu Z (于卓) (1992). A study on root system of *Nitraria tangutorum*. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 12(4), 50–54. (in Chinese with English abstract)
- Wang WQ (王文卿), MA ZJ (马占杰), Feng LZ (冯玲正)

(2003). Plant for protecting ridge of terrace fields in hilly area of Qinghai: *Tamarix austremongolica* Nakai. *Research of Soil and Water Conservation*(水土保持研究), 10(2), 112 – 139. (in Chinese with English abstract)

Wu Q (吴琦), Zhang XM (张希明) (2005). Effects of moisture conditions on the gas exchange of *Haloxylon ammodendron*. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 22(1), 79 – 84. (in Chinese with English abstract)

Yang PL (杨培岭), Luo YP (罗远培), Shi YP (石元普) (1993). Water transfer in soil-root system. *Journal of Beijing Agriculture University* (北京农业大学学报), 19, 25 – 30. (in Chinese with English abstract)

Zhang AL (张爱良), Miao GY (苗果园) (1997). Relationships between crop roots and water. *Journal of Crop Research* (作物研究), 11(2), 4 – 6. (in Chinese with English abstract)

Zhang GS (张国盛), Wang LH (王林和), Li YL (李玉灵), Dong Z (董智), Qi JQ (齐锦秋) (1999). Root distribution and root weight of *Sabina vulgaris* in Mu Us sandy land. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 19, 378 – 383. (in Chinese with English abstract)

Zhang H (张宏) (1999). Biomass dynamics and energy efficiency of *Rhizotaxy* of the Grass + Forbs Steppe in Mu Us Sandland. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 19, 151 – 155. (in Chinese with English abstract)

Zhao AF (赵爱芬), Zhao XY (赵学勇), Chang XL (常学礼) (1997). Research on vegetative root characteristics of dunes in Naiman County. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 17 (Suppl.1), 41 – 45. (in Chinese with English abstract)

责任编辑:郭 柯 责任编辑:姜联合 王 葳