DOI: 10.20103/j.stxb.202304300908

菲鲁然·艾勒肯,戴岳,安外尔·阿卜杜热伊木.克里雅河尾闾不同地下水埋深对多枝柽柳幼苗根系形态和生物量分配的影响.生态学报,2025,45(8):4036-4045.

Flora Erkin, Dai Y, Anwar Abdureyim.Effects of different groundwater depths on the root morphology and biomass allocation of *Tamarix ramosissima* Ledeb. seedlings at the tail of the Keriya River.Acta Ecologica Sinica,2025,45(8):4036-4045.

克里雅河尾闾不同地下水埋深对多枝柽柳幼苗根系形态和生物量分配的影响

菲鲁然·艾勒肯[1,3,4],戴 岳[2,3,4,*],安外尔·阿卜杜热伊木[1,3,4]

1 新疆大学生态与环境学院,乌鲁木齐 830017

2 新疆大学地理与遥感科学学院,乌鲁木齐 830017

3 新疆大学塔克拉玛干沙漠腹地绿洲过程新疆野外科学观测研究站, 于田 848400

4 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830017

摘要:柽柳(*Tamarix* sp.)是我国西北干旱半干旱地区防风固沙的优势树种。柽柳幼苗成功定居并生长发育为成熟个体需要适应各种逆境条件,这一过程是决定柽柳种群实现天然更新的关键。以塔克拉玛干沙漠腹地达理雅博依绿洲的多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)幼苗为研究对象,采集其根系和土壤样品,分析了不同地下水埋深条件下(1.8 m 和 3.0 m)不同基径范围多枝柽柳幼苗根深、根干重、比根长、根表面积、比根面积、侧根数目、根冠比、地上/下生物量分配、根系生物量垂直分布特征,明确其对干旱环境的响应。结果表明:随着基径增大,多枝柽柳幼苗扎根深度加深,根干重和根表面积增加,比根长和比根面积则逐渐降低,根系趋于发达。随着土壤深度的加深多枝柽柳幼苗根系生物量逐渐减少,根系生物量主要集中在 0—40 cm 的土壤层,占总生物量的 68.42%。在地下水埋深 1.8 m 的样地,多枝柽柳幼苗根系深度变化范围是 83.5—173.5 cm,根干重和根表面积较大,随着基径的增大地上生物量分配增大,根冠比为 0.95,侧根数目、总根长、侧根平均直径大于地下水埋深 3.0 m 样地的;而在地下水埋深 3.0 m 的样地,多枝柽柳幼苗根系深度变化范围是 42—192 cm,比根长和比根面积较大,随着基径的增大地下生物量分配增大,根冠比为 0.35,侧根的平均根长大于地下水埋深 1.8 m 样地的。塔克拉玛干沙漠达理雅博依绿洲多枝柽柳幼苗的根系形态受到地下水埋深的影响,体现了其对干旱环境的适应性。

关键词:多枝柽柳; 根系形态; 生物量分配; 地下水埋深

Effects of different groundwater depths on the root morphology and biomass allocation of *Tamarix ramosissima* Ledeb. seedlings at the tail of the Keriya River

FLORA Erkin[1,3,4], DAI Yue[2,3,4,*], ANWAR Abdureyim[1,3,4]

1 *College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi* 830017, *China*

2 *College of Geography and Remote Sensing Science, Xinjiang University, Urumqi* 830017, *China*

3 *Xinjiang Field Scientific Observation and Research Station for the Oasisization Process in the Hinterland of Taklamakan Desert, Xinjiang University, Yutian* 848400, *China*

4 *Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi* 830017, *China*

Abstract: *Tamarix* sp. is a dominant shrub species used for windbreaks and sand fixation in the desert of Northwest China. The successful establishment of *Tamarix* sp. seedlings and their growth into mature individuals require their adaptation to various adverse conditions, which is the key to the natural regeneration of the *Tamarix* population. To clarify the root

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2023D01C13);国家自然科学基金(32160260,31800613)

收稿日期:2023-04-30; **网络出版日期**:2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: daiyue@xju.edu.cn

morphology and biomass allocation characteristics of *Tamarix ramosissima* Ledeb. seedlings in response to changes of groundwater depths at the Daliyaboyi Oasis in the hinterland of Taklamakan Desert, rooting depth, root dry weigh, specific root length, root surface area, specific root area, number of lateral roots, root/shoot ratio, aboveground and belowground biomass allocation, vertical distribution of root biomass of *T. ramosissima* seedlings with different basal stem diameter classes were analyzed under groundwater depth of 1.8 m and 3.0 m. The results showed that as the basal stem diameter increased, the rooting depth of *T. ramosissima* seedlings increased, and the root dry weight and root surface area increased, whereas the root length and specific root area decreased gradually, indicating that the root system of *T. ramosissima* seedlings tended to develop. As the soil depth increased, the root biomass gradually decreased, and the root biomass was mainly distributed in the 0—40 cm soil layer, accounting for 68.42% of the total root biomass. At the sample site with a groundwater depth of 1.8 m, the root depth of *T. ramosissima* seedlings ranged from 83.5 to 173.5 cm, the root dry weight and root surface area were higher, the allocation of aboveground biomass increased with an increase in basal diameter, the root-to-shoot ratio was 0.95, and the number of lateral roots, total root length, and average diameter of lateral roots were higher than those at the groundwater depth of 3.0 m. At the sample site with a groundwater depth of 3.0 m, root depth varied from 42 to 192 cm, the specific root length and specific root area were larger, allocation of underground biomass increased with the increase in basal diameter, and the root-to-shoot ratio was 0.35. The number of lateral roots and total root length were relatively small, while the average root length of lateral roots was longer than that at a groundwater depth of 1.8 m, indicating that *T. ramosissima* seedlings adapted to drought stress through the elongation of lateral roots. The root morphology of *T. ramosissima* seedlings was affected by groundwater depth in the Daliyaboyi oasis, which reflected its adaptability to arid environments.

Key Words: *Tamarix ramosissima*; root morphology; biomass allocation; groundwater depths

植物的功能性状影响植物对水分和养分的获取,并影响生态系统特性[1]。帮助植物获取有限养分和水分的功能性状对沙漠植物物种更为重要[2]。根系是植物吸收水分和养分的重要器官,其形态特征可以反映不同物种在长期进化过程中的适应性和竞争能力[3]。植物根系形态结构特性的研究已成为植物营养效率、水分效率等资源利用效率研究的重要内容,也是植物生理生态研究的热点[4]。荒漠植物为了适应干旱胁迫,在长期进化过程中形成了抗旱机制,其中植物根系的形态调节是抵抗干旱胁迫和适应干旱环境的重要生态策略[5]。已有研究表明,在干旱条件下,植物主根深度加深,比根长、根表面积和比根面积增大[6—10]。植物可以通过改变形态特征来适应环境条件的变化,增加生存概率。

植物各器官的生物量分配在植物获取资源和竞争方面具有重要影响[11]。最优分配理论(Optimal replacement algorithm, OPT)认为,植物将资源分配到最需要的器官中,从而更有效地获取最稀缺的资源[12]。在不同生长环境条件下,植物的根、茎、叶等组成部分之间具有竞争关系,通过内部平衡和分配,使生物量分配最适合其生长发育[13]。当植物受到水分和养分的胁迫时,植物分配至根系的生物量会增加,以获取更多的水分和养分[14—17]。在灌溉条件下,较高的水分和养分使柽柳幼苗向地上分配更多的生物量,即根冠比值降低[15]。地下部分生物量的增加可以缓解植物养分和水分供给较低的情况[18]。目前,根系形态特征和生物量分配研究主要集中在人工林[19—20],而对自然环境条件下的幼苗根系形态特征及生物量分配方面的研究较少。因此,本研究探讨了自然环境条件下生长的多枝柽柳幼苗根系形态及生物量分配特征。

柽柳属(*Tamarix*)植物是达理雅博依绿洲的建群种或优势种之一。柽柳群落在绿洲的生物多样性保护、绿洲演化以及荒漠化防治过程中具有重要作用,其生长和分布与地表水-地下水条件有着密切的关系[21—22]。本研究通过分析多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)幼苗根系形态和生物量分配特征,试图明晰:(1)随着基径的增大,多枝柽柳幼苗的根系形态特征如何变化来适应环境。(2)在常年地表水径流的自然环境条件下,地下水埋深对多枝柽柳幼苗根系形态特征和生物量分配上有何影响。以上研究为进一步了解荒漠地区植物的适应特征提供了理论依据。

1 研究区概况

克里雅河是塔里木盆地南缘第二大河流,它发源于昆仑山,出山后贯穿于田县城向北流入塔克拉玛干沙漠腹地。在距离于田县城约 250 km 处的地方,形成了树叶状天然尾闾绿洲——达理雅博依绿洲[23—24]。该绿洲因其与世隔绝,交通不便而受到干扰因素较少,基本保持了自然条件下的状态,具有相对“原始”的特征[23]。达理雅博依绿洲位于塔克拉玛干沙漠腹地(图 1),气候极端干旱,年降水量仅 17 mm,年均气温 11.8 ℃,相对湿度 40.2%,年潜在蒸发量 2480 mm[25]。绿洲植物组成以胡杨(*Populus euphratica*)、灰胡杨(*Populus. pruinosa*)、柽柳(*T. chinensis*)、多枝柽柳(*T. ramosissima*)、芦苇(*Phragmites australis*)和骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)为主。绿洲地表水覆盖范围有所扩大,地表水分布区域主要集中在绿洲西部、中部和东南部[26]。地表水漫溢季节性变化明显,2 月和 8 月的漫溢面积最大值,5 月的漫溢面积最小[22]。

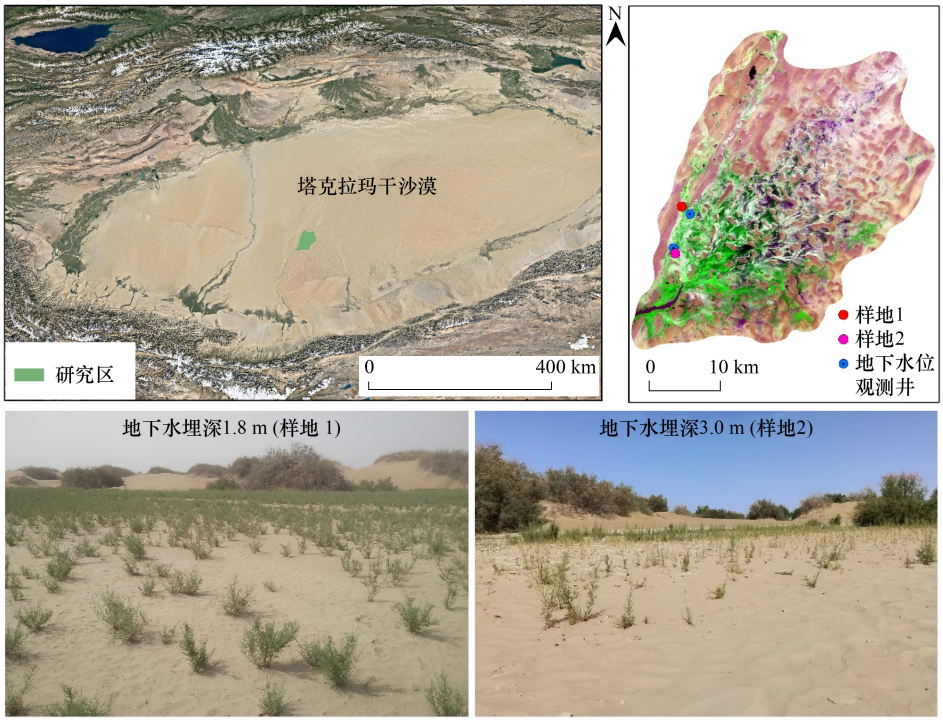

图 1 研究区概况图

Fig.1 Study area map

2 研究方法

2.1 样品采集

(1)样方调查

为了明晰不同地下水埋深对多枝柽柳幼苗根系分布和生物量分配的影响,2021 年 6 月中旬及 2022 年 7 月中旬,在达理雅博依绿洲分别选择地下水埋深 1.8 m(样地 1)和地下水埋深 3.0 m(样地 2)的多枝柽柳幼苗分布区作为研究地(图 1),在每个样地内设置 3 个 1 m×1 m 的样方,记录多枝柽柳幼苗的基径、株高和冠径(表 1)。

(2)植物根系取样

样地内随机选择不同基径多枝柽柳幼苗进行全根挖掘,根据样方调查情况,将多枝柽柳幼苗划分为 0—2 mm、2—5 mm、5—10 mm 的三个径级范围。2021 年获取了进行根系挖掘的多枝柽柳幼苗总的根系生物量,

2022 年每隔 20 cm 分层取了 3 株径级为 5—10 mm 的多枝柽柳幼苗根系生物量。形态和各径级下挖掘个数如表 2。

表 1　不同地下水埋深条件下多枝柽柳幼苗的生长调查情况(平均值±标准偏差)

Table 1　The growth investigation of *Tamarix ramosissima* seedlings under different groundwater depths (Mean±SD)

样地 Sample site	地下水埋深 Groundwater depth/m	基径 Basal stem diameter/mm	株高 Height/cm	冠径 Crown width/cm	密度 Density/(株/m²)
样地 1 Sample site 1	1.8	5.3±0.9	22.2±3.2	14.0±1.7	68±12
样地 2 Sample site 2	3.0	2.6±1.01	17.2±8.8	9.9±4.7	24±8

表 2　全根挖掘的多枝柽柳幼苗形态指标(平均值±标准偏差)

Table 2　The morphology characteristics of *Tamarix ramosissima* seedlings for whole root excavation (Mean±SD)

地下水埋深 Groundwater depth/m	基径划分 Basal stem diameter classification/mm	株高 Height/cm	冠径 Crown width/cm	根深 Rooting depth/cm	样本量 Sample number/株
1.8	0—2	3.00±1.65	3.35±0.74	110.00±7.00	3
	2—5	25.17±3.25	10.42±3.64	113.00±19.38	3
	5—10	42.34±11.94	15.18±4.19	112.00±35.56	6
3.0	0—2	9.00±2.60	7.90±2.86	68.93±29.22	3
	2—5	15.07±2.14	5.18±1.72	72.33±5.51	3
	5—10	70.33±11.59	45.00±8.23	162.67±26.63	3

(3)土壤取样

在每个样地距离全根挖掘多枝柽柳幼苗 50 cm 处取土壤样品,使用土钻法垂直向下每隔 20 cm 取一个土壤样品,一直取到土壤层出水,每层 3 个重复,土样装入铝盒称鲜重,带回实验室用烘干法测量土壤含水量。

2.2　样品测定

将全根系挖掘多枝柽柳幼苗洗净表土后,将整株分为叶、茎、根 3 个部分,置入烘箱内烘干(60 ℃, 48 h),再称量各器官干重。地上生物量为叶和茎生物量的总和,地下生物量为根系生物量。测根系长度和直径后将全部根系摆放在有参照物的白纸上拍照,利用 Adobe Photoshop 2020 图像处理软件抠图处理,根表面积采用扫描叶面积仪(HP Scan jet 4850)测定[27],放置 60℃烘箱烘干 48 h 至恒重后称质量,用于比根长和比根面积计算。地上生物量为叶和茎生物量的总和,地下生物量为根系生物量。计算公式如下:

$$比根长=\frac{总根长(cm)}{根干重(g)} \tag{1}$$

$$比根面积=\frac{总根面积(cm^2)}{根干重(g)} \tag{2}$$

$$根冠比=\frac{地下部分干重(g)}{地上部分干重(g)} \tag{3}$$

2.3　数据分析

采用 SPSS 23.0 对数据进行分析,使用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较多枝柽柳幼苗不同径级的根系深度、根干重、比根长、根表面积、比根面积、根冠比差异的显著性,运用最小显著差数法(LSD)对数据进行多重比较,在 0.05 水平上对数据进行显著性检验;利用 Origin 2021 绘图。

3　结果与分析

3.1　土壤含水量变化特征

地下水埋深 1.8 m 样地和 3.0 m 样地的土壤含水量(Soil water content, SWC)均随着土壤深度的增大而增

大(图 2),变化范围分别是 12.11%—34.00%和 0.64%—27.91%。

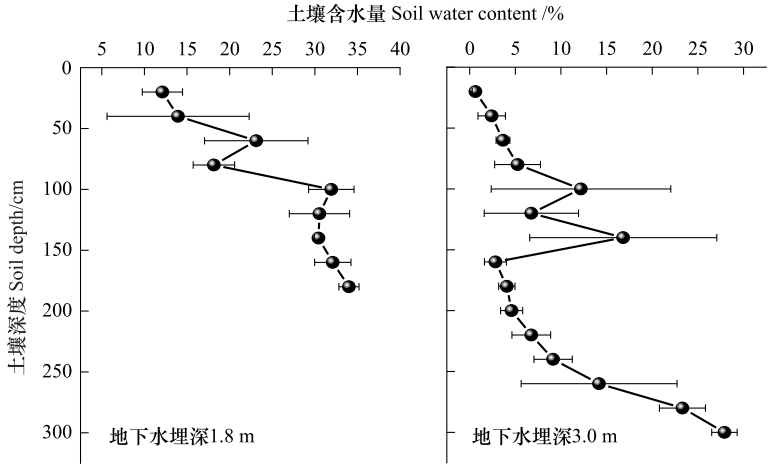

图 2 达理雅博依绿洲不同地下水埋深样地的土壤含水量垂直分布特征(平均值±标准偏差,$n=3$)

Fig.2 The vertical variation of the soil water content at two sample sites with different groundwater depths of 1.8 m and 3.0 m at the Daliyaboyi Oasis (Mean±SD, $n=3$)

3.2 多枝柽柳幼苗根系形态特征

地下水埋深 1.8 m 样地和 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗根系深度变化范围分别是 83.5—173.5 cm 和 42—192 cm(图 3)。地下水埋深 1.8 m 样地,各径级间多枝柽柳幼苗根深度无显著差异($P>0.05$)。地下水埋深 3.0 m 样地,径级 5—10 mm 的多枝柽柳幼苗主根深度显著深于其它两个径级($P<0.05$)。地下水埋深 1.8 m 样地,径级为 2—5 mm 的幼苗根深显著深于地下水埋深 3.0 m 样地的相同径级根深($P<0.05$)。

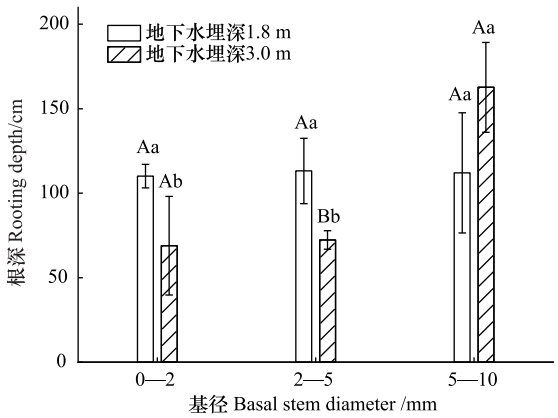

图 3 不同地下水埋深样地的多枝柽柳幼苗根系深度变化特征

Fig.3 Characteristics of rooting depth of *Tamarix ramosissima* seedlings at two sample sites with groundwater depths of 1.8 m and 3.0 m

不同大写字母表示不同样地同一个基径根深之间的差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一个样地不同基径根深之间的差异显著 $P<0.05$

地下水埋深 1.8 m 样地和 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗的根干重均随着基径的增大显著增加(图 4),变化范围分别为 0. 32—12.58 g 和 0.08—7.37 g,径级为 5—10 mm 的多枝柽柳幼苗根干重显著高于其它两个基径($P<0.05$)。地下水埋深 1.8 m 样地和 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗比根长均随着基径的增大显著减少(图 4),变化范围分别为 71.93—429.08 cm/g 和 86.86—2823.17 cm/g,其中径级为 0—2 mm 的多枝柽柳幼苗比根长显著高于其它两个基径($P<0.05$)。地下水埋深 1.8 m 样地和 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗的根表面积均随着基径的增大显著增大(图 4),变化范围分别为 18.13—186.95 cm^2 和 6.73—65.98 cm^2,径级为 5—10 mm 的多枝柽柳幼苗根表面积值显著高于其它两个基径($P<0.05$)。地下水埋深 1.8 m 样地和 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗的比根面积随着基径的增大呈降低趋势(图 4),变化范围分别是 23.41—58.63 cm^2/g 和 32.16—250.98 cm^2/g,三个径级间多枝柽柳幼苗的比根面积差异不显著($P>0.05$)。

3.3 多枝柽柳幼苗侧根数目、长度、直径的变化

两个样地多枝柽柳幼苗的根系分支(一级根、二级根、三级根)、侧根数目、总根长和平均根长均随着基径的增大而增大(图 5)。地下水埋深 1.8 m 样地不同径级多枝柽柳幼苗的侧根平均直径变化为:2—5 mm> 5—

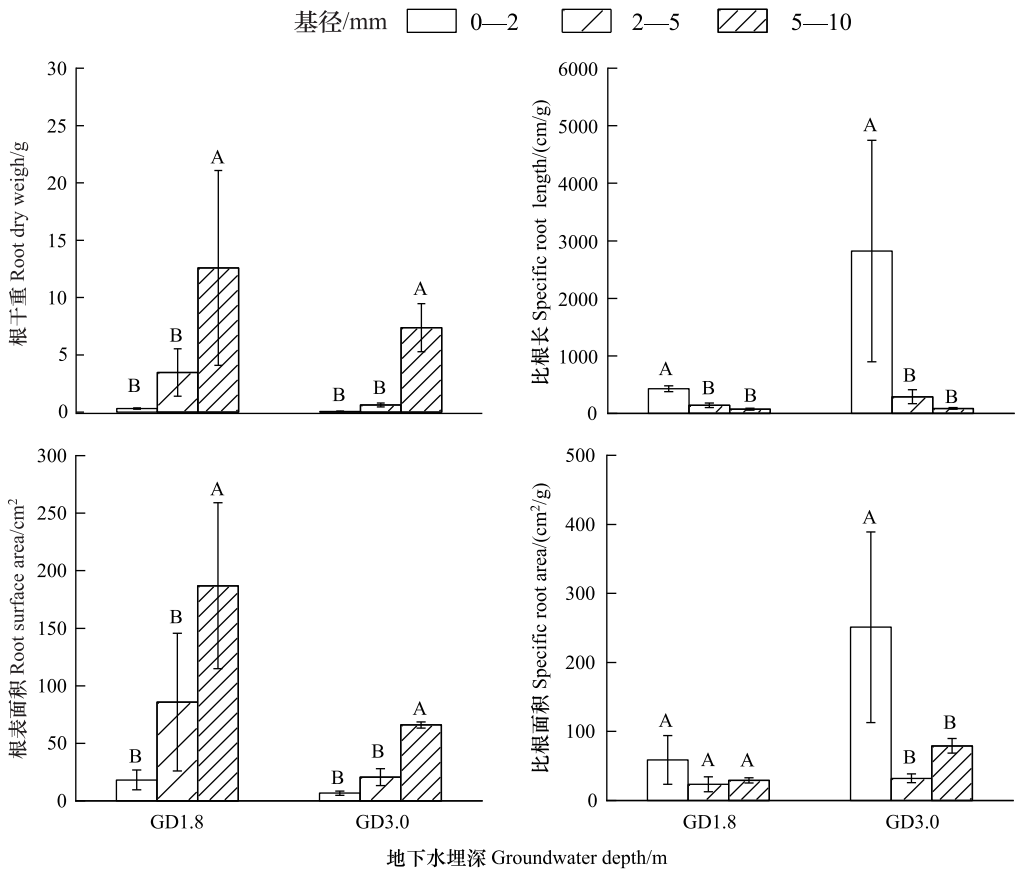

图 4　不同地下水埋深样地不同基径多枝柽柳幼苗根系形态特征(平均值±标准偏差)

Fig.4　Root morphological characteristics of *Tamarix ramosissima* seedlings with different basal stem diameters at two sample sites with groundwater depths of 1.8 m (GD1.8) **and 3.0 m** (GD3.0) (Mean±SD)

GD1.8 表示地下水埋深为 1.8 m, GD3.0 表示地下水埋深为 3.0 m;不同大写字母表示同一地下水埋深条件下基径间存在显著差异(P<0.05)

10 mm> 0—5 mm(图 5),地下水埋深 3.0 m 样地不同径级多枝柽柳幼苗的侧根平均直径变化为:5—10 mm> 0—5 mm> 2—5 mm(图 5)。地下水埋深 1.8 m 样地多枝柽柳幼苗的侧根数目、总根长、侧根平均直径高于地下水埋深 3.0 m 样地的,而多枝柽柳幼苗侧根的平均根长则表现为地下水埋深 3.0 m 样地大于地下水埋深 1.8 m样地。

3.4　多枝柽柳幼苗地上/地下生物量分配和不同土壤深度的根系生物量分配

地下水埋深 1.8 m 样地,多枝柽柳幼苗的根冠比随着基径的增大显著降低(图 6),不同径级下根冠比平均值分别是 1.43、0.73 和 0.81,其中 0—2 mm 径级的根冠比显著高于其它两个径级(P<0.05)。地下水埋深 3.0 m样地多枝柽柳幼苗的根冠比先增大后减少(图 6),三个径级下多枝柽柳幼苗的根冠比平均值分别是 0.15、0.72 和 0.20,其中 2—5 mm 径级的根冠比显著高于其它两个径级(P<0.05)。

地下水埋深 1.8 m 样地和 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗的地上生物量和地下生物量均随着基径的增大而增大,呈显著正相关关系(图 7)。地下水埋深 1.8 m 样地多枝柽柳幼苗生物量分配线性拟合斜率小于 1,说明随着基径的增大地上生物量分配增大;地下水埋深 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗生物量分配线性拟合斜率大于 1,表明随着基径的增大地下生物量分配增大,多枝柽柳幼苗根冠比与总生物量的线性关系进一步证实了这一点(图 7)。

在地下水埋深 3.0 m 样地,多枝柽柳幼苗的根系生物量主要分布在 0—40 cm 土层,占到总根系生物量的 68.42%,随着土壤深度的增加多枝柽柳幼苗的根系生物量减少(图 8)。多枝柽柳幼苗的根系生物量占比在

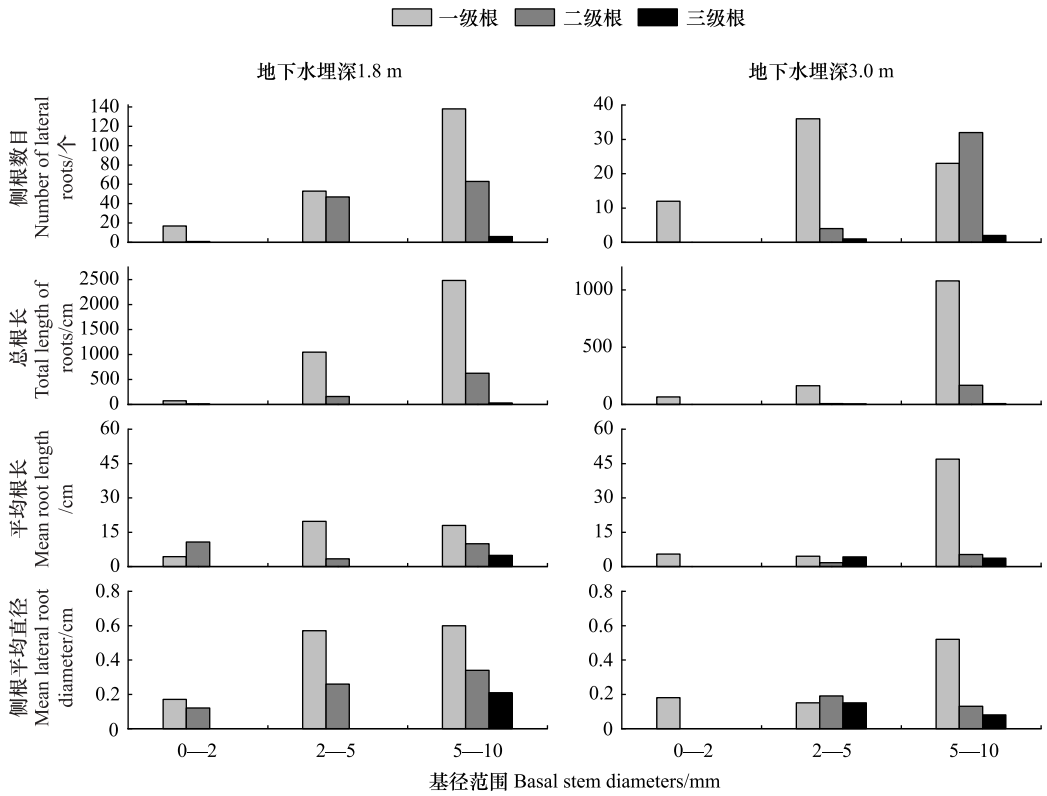

图 5 不同地下水埋样地不同基径的多枝柽柳幼苗侧根特征参数

Fig.5 Characteristics of lateral roots of *Tamarix ramosissima* seedlings with different basal stem diameters at two sample sites with groundwater depth of 1.8 m and 3.0 m

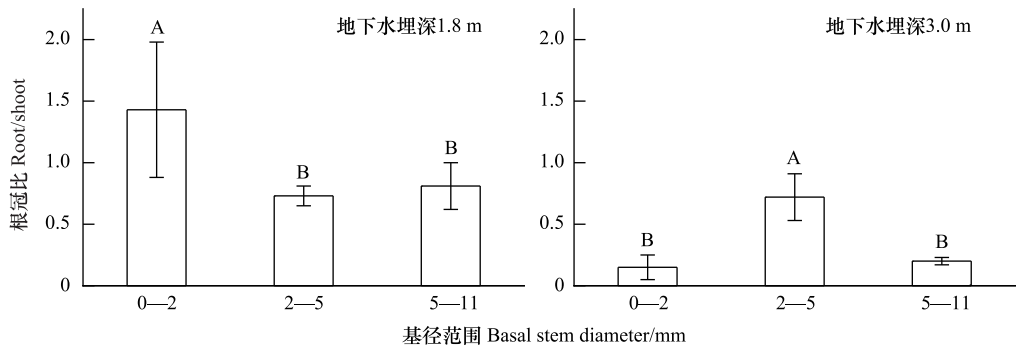

图 6 不同地下水埋深样地不同基径多枝柽柳幼苗的根冠比(平均值±标准偏差)

Fig.6 Root-to-shoot ratio of *Tamarix ramosissima* seedlings with different basal stem diameters at two sample sites with groundwater depth of 1.8 m and 3.0 m (Mean±SD)

不同大写字母表示径级间差异显著(P<0.05)

0—20 cm 土层最大,为 42.57%,其次为 20—40 cm 和 80—100 cm 土层,占比分别为 25.85%和 13.42%,120 cm 土层深度以下根系生物量占比不足 1%。

4 讨论

4.1 多枝柽柳幼苗的根系形态特征

在干旱半干旱地区,土壤水分是制约植物生长和繁衍的关键性因子,它会影响植物个体的发育,决定植物

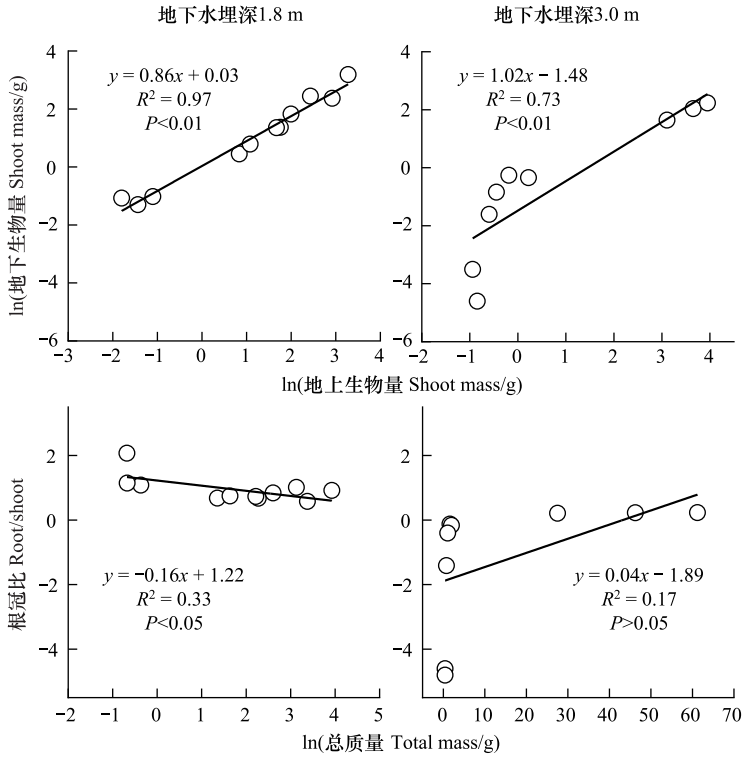

图 7　不同地下水埋深样地多枝柽柳幼苗地上/地下生物量分配特征

Fig.7　Aboveground and belowground biomass allocation of *Tamarix ramosissima* seedlings at two sample sites with groundwater depths of 1.8 m and 3.0 m

的类型,并限制植被的分布[28]。达理雅博依绿洲土壤含水量随着土壤深度的加深而增大(图 2),这与塔克拉玛干沙漠土壤水分研究结果一致[29—30]。地下水埋深 1.8 m样地土层 20 cm 土壤含水量较高,为多枝柽柳幼苗的生长提供了有利条件。

根系是植物吸收养分和水分的重要器官,植物在逆境条件下会通过改变根系分布及根系形态来适应不利的环境[31]。当地下水埋深增加时,干旱区疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Schap.)和多枝柽柳通过增大扎根深度、提高根系生物量以适应干旱胁迫环境来维持其对土壤中水分和营养的需求[32]。本研究中,多枝柽柳幼苗的扎根深度总体上随着基径的增大而增加(图 3),地下水埋深 3.0 m 样地扎根深度达 192 cm,表明多枝柽柳幼苗在生长过程中根系趋于发达,趋向于吸收更深层的稳定土壤水。

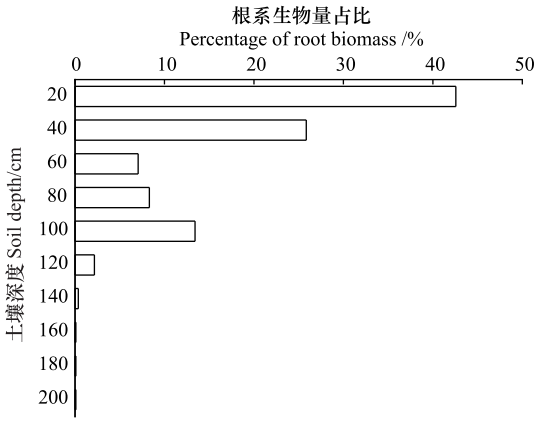

图 8　地下水埋深 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗根系生物量的垂直分布特征

Fig.8　Vertical distribution of percentage of root biomass of *Tamarix ramosissima* seedlings at different soil layers in the sample site with groundwater depth of 3.0 m

地下水埋深对根干重、根表面积和根冠比具有显著影响,深的地下水埋深增加了根冠比,但降低了根表面积和根干重[33—34]。本研究中基径为 0—10 mm 的多枝柽柳幼苗在地下水埋深 1.8 m 样地的根干重平均值为 5.93 g,在地下水埋深 3.0 m 样地的根干重平均值为 2.70 g,深地下水埋深的多枝柽柳幼苗降低了根干重(图 4)。比根长是根长和生物量的比值,可以表征根系收益和花费的关系[35]。一般认为生长较快的植物通常比生长慢的植物具有较大的比根长[36],随着植株的生长

和根系生物量的增加比根长会减小[8],干旱处理会促进比根长的增加[4]。地下水埋深为 3.0 m 样地的多枝柽柳幼苗比根长更大,两个样地中不同基径多枝柽柳幼苗的比根长均表现为:0—2 mm> 2—5 mm>5—10 mm(图 4),表明基径小的多枝柽柳幼苗生长速率更快。

根表面积反映了根系整体吸收水分和养分的有效面积[37—39]。本研究中两个样地的多枝柽柳幼苗的根表面积均随着基径的增大而增大,表明多枝柽柳幼苗根系吸收水分和养分的能力增强[40]。比根面积较大的植物具有较高的水分和养分吸收效率[41]。本研究中基径最小的多枝柽柳幼苗比根面积最大,随着基径的增大多枝柽柳幼苗的比根面积减少(图 4),这种趋势表明基径小的幼苗根系处于快速生长阶段。金塔绿洲人工林三年生多枝柽柳的比根面积为(3.53±0.32) cm^2/g[37],远小于本研究两个样地的多枝柽柳幼苗比根面积平均值(33.40 cm^2/g 和 147.42 cm^2/g),表明自然生境中的多枝柽柳幼苗快速生长过程中需要较高的水分和养分。

随地下水位的降低,黄河三角洲柽柳侧根数量先增加后快速降低[19]。图 5 显示,地下水埋深较深样地的多枝柽柳幼苗侧根数目和总根长较小,平均根长较高,表明多枝柽柳幼苗通过侧根的伸长来适应干旱胁迫。单立山等[4]研究不同水分处理条件下红砂(*Reaumuria songarica*)幼苗侧根的变化特征,结果表明干旱条件下侧根数目和总根长减小、平均根长呈增加的趋势,这与本研究中深地下水埋深样地多枝柽柳幼苗的侧根数目、总根长和平均根长的变化趋势一致。

4.2 多枝柽柳幼苗的生物量分配特征

在干旱缺水的情况下,植物可通过改变生物量分配来获取更多的水分从而适应干旱胁迫[42—43]。干旱条件下植物根冠比较高,根冠比的增加可以扩大水分和养分的吸收量,增强植物抗旱和抗瘠薄的能力[44—45]。灌溉条件下,植物根冠比降低[15]。曾凡江等[44]研究表明,当灌溉时间大致与局部淹水时间一致时,多枝柽柳幼苗生物量主要分配到地上部分,根冠比平均值为 0.75(图 6)。塔克拉玛干沙漠南缘骆驼刺和柽柳幼苗,根冠比随着生长逐渐增大,反映了植物将越来越多的资源投入到了地下部分[46],与本研究中地下水埋深 3.0 m 样地多枝柽柳幼苗的根冠比变化趋势较相似(图 7)。相比而言,本研究区多枝柽柳幼苗根冠比较小,两个样地多枝柽柳幼苗根冠比的平均值分别为 0.95 和 0.35,表明研究区的土壤水分状况较好,多枝柽柳幼苗将更多的生物量分配到地上部分。地下水埋深 3.0 样地的多枝柽柳幼苗根系生物量主要分布在 0—40 cm 土层(图 8),也反映出样地浅层土壤水分条件较好。

5 结论

多枝柽柳幼苗随着基径的增大,扎根深度增加,根干重和根表面积增大,比根长和比根面积降低,表明多枝柽柳幼苗处于快速生长阶段。随着土壤深度的加深多枝柽柳幼苗的根系生物量逐渐减少,主要分布在 0—40 cm 土层,表明浅层土壤水分条件好。地下水埋深较浅时,多枝柽柳幼苗扎根深度较浅,根干重和根表面积较高,增加侧根的分支以及侧根数目和平均直径;地下水埋深较深时,多枝柽柳幼苗扎根深度加深,比根长和比根面积较高,增长侧根平均长度。

参考文献(References):

[1] Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte M, Cornwell W, Craine J, Gurvich D, Urcelay C, Veneklaas E, Reich P, Poorter L, Wright I, Ray P, Enrico L, Pausas J, Vos A D, Buchmann N, Funes G, Quétier F, Hodgson J, Thompson K, Morgan H, Steege H, Sack L, Blonder B, Poschlod P, Vaieretti M V, Conti G, Staver A, Aquino S, Cornelissen J. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 2016, 64: 715-716.

[2] Shan L. Characteristics and relationships of foliar water and leaf functional traits of desert plants. Plant Physiology Journal, 2013, 49 (2): 153-160.

[3] Lozano Y M, Aguilar-Trigueros C A, Ospina J M, Rillig M C. Drought legacy effects on root morphological traits and plant biomass via soil biota feedback. New Phytologist, 2022, 236(1): 222-234.

[4] 单立山, 李毅, 段雅楠, 耿东梅, 李真银, 张荣, 段桂芳, Жигунов, Анатолий, Василье. 红砂幼苗根系形态特征和水分利用效率对土壤水分变化的响应. 西北植物学报, 2014, 34(6): 1198-1205.

[5] 朱丽, 黄刚, 唐立松, 李彦, 张永梅, 盛建东. 梭梭根系的水分再分配特征对其生理和形态的影响. 干旱区研究, 2017, 34(3): 638-647.

[6] Fan J L, McConkey B, Wang H, Janzen H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. Field Crops Research, 2016, 189: 68-74.

[7] Xu G Q, McDowell N G, Li Y. A possible link between life and death of a xeric tree in desert. Journal of Plant Physiology, 2016, 194: 35-44.
[8] de Vries F T, Brown C, Stevens C J. Grassland species root response to drought: consequences for soil carbon and nitrogen availability. Plant and Soil, 2016, 409(1): 297-312.
[9] Ma X D, Li J G. Response in root growth of *Tamarix ramosissima* seedlings to different water treatments in the arid lower Tarim River. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. May 20-22, 2011, Xi'an. IEEE, 2011: 642-645.
[10] Wang R M, He N P, Li S G, Xu L, Li M X. Variation and adaptation of leaf water content among species, communities, and biomes. Environmental Research Letters, 2021, 16(12): 124038.
[11] Tilman D. Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988.
[12] McCarthy M C, Enquist B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation. Functional Ecology, 2007, 21(4): 713-720.
[13] 詹瑾, 李玉霖, 韩丹, 杨红玲. 半干旱沙区 3 种优势固沙灌木生物量分配及其生态学意义. 中国沙漠, 2020, 40(5): 149-157.
[14] Padilla F M, Miranda J D, Jorquera M J, Pugnaire F I. Variability in amount and frequency of water supply affects roots but not growth of arid shrubs. Plant Ecology, 2009, 204(2): 261-270.
[15] Shan L S, Zhang X M, Wang Y K, Wang H, Yan H N, Wei J, Xu H. Influence of moisture on the growth and biomass allocation in *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima* seedlings in the shelterbelt along the Tarim Desert Highway, Xinjiang, China. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 93-101.
[16] Zhang Z H, Tariq A, Zeng F J, Graciano C, Zhang B. Nitrogen application mitigates drought-induced metabolic changes in *Alhagi sparsifolia* seedlings by regulating nutrient and biomass allocation patterns. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 155: 828-841.
[17] 张曦, 王振南, 陆姣云, 杨梅, 杨惠敏. 紫花苜蓿叶性状对干旱的阶段性响应. 生态学报, 2016, 36(9): 2669-2676.
[18] 孙书存, 陈灵芝. 辽东栎幼苗对干旱和去叶的生态反应的初步研究. 生态学报, 2000, 20(5): 893-897.
[19] 苏丽, 董波涛, 孙佳, 赵西梅, 吴春红, 夏江宝. 地下水位对黄河三角洲柽柳根系生长的影响. 生态学报, 2021, 41(10): 3794-3804.
[20] Sun J, Zhao X M, Fang Y, Xu W G, Gao F L, Zhao W L, Fu Q Q, Xia J B. Root growth and architecture of *Tamarix chinensis* in response to the groundwater level in the Yellow River Delta. Marine Pollution Bulletin, 2022, 179: 113717.
[21] 韩路. 塔里木河上游荒漠河岸林植物群落动态与优势种群生态特征研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
[22] Wang J H, Zhang F, Luo G M, Guo Y C, Zheng J H, Wu S X, Wang D W, Liu S H, Shi Q D. Factors influencing seasonal changes in inundation of the daliyaboyi oasis, lower Keriya River valley, central Tarim Basin, China. Remote Sensing, 2022, 14(19): 5050.
[23] 师庆东, 郭玉川, 周小龙, 戴岳, 伊力亚斯江·努尔麦麦提, 李诚志. 塔克拉玛干沙漠克里雅河尾闾达理雅博依绿洲地表水、地下水对植被格局的影响机制. 新疆大学学报: 自然科学版, 2019(3): 253-259.
[24] 安外尔·阿卜杜热伊木, 戴岳, 师庆东, 张峰. 克里雅河尾闾沙漠腹地绿洲胡杨年轮特征分析. 新疆大学学报: 自然科学版(中英文), 2022(2): 213-218.
[25] 樊自立, 季方. 克里雅河中下游自然环境变迁与绿色走廊保护. 干旱区研究, 1989, 6(3): 16-24.
[26] Li H, Shi Q D, Wan Y B, Shi H B, Imin B. Using sentinel-2 images to map the *Populus euphratica* distribution based on the spectral difference acquired at the key phenological stage. Forests, 2021, 12(2): 147.
[27] 冯冬霞, 施生锦. 叶面积测定方法的研究效果初报.中国农学通报, 2005, 21(6): 150 -155.
[28] 李一丁, 桑清田, 张灏, 刘龙昌, 潘庆民, 王宇, 刘伟, 袁文平. 内蒙古半干旱地区空气和土壤加湿对幼龄樟子松生长的影响. 植物生态学报, 2022, 46(9): 1077-1085.
[29] Fu A H, Li W H, Li J G, Chen Y N, Ma X D. Response of water status of *Populus* bolleana lauche to the amount of irrigation water in the southern edge of Taklimakan Desert, China. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 796-806.
[30] 黄婉媛, 戴岳, 安外尔·阿卜杜热伊木. 塔克拉玛干沙漠腹地柽柳年轮宽度对地下水埋深的响应. 西北植物学报, 2024, 44(1): 134-141.
[31] 刘莹, 盖钧镒, 吕彗能. 作物根系形态与非生物胁迫耐性关系的研究进展. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 265-269.
[32] Liu Y H, Xu Z, Duffy R, Chen W L, An S Q, Liu S R, Liu F D. Analyzing relationships among water uptake patterns, rootlet biomass distribution and soil water content profile in a subalpine shrubland using water isotopes. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(6): 380-386.
[33] Zeng F J, Song C, Guo H F, Liu B, Luo W C, Gui D W, Arndt S, Guo D L. Responses of root growth of *Alhagi sparsifolia* Shap. (Fabaceae) to different simulated groundwater depths in the southern fringe of the Taklimakan Desert, China. Journal of Arid Land, 2013, 5(2): 220-232.
[34] Ruttanaprasert R, Jogloy S, Vorasoot N, Kesmala T, Kanwar R S, Holbrook C C, Patanothai A. Root responses of Jerusalem artichoke genotypes to different water regimes. Biomass and Bioenergy, 2015, 81: 369-377.
[35] 赵晶, 汪溪远. 古尔班通古特沙漠南缘 3 种生活型草本植物生物量分配及相关生长关系. 植物研究, 2017, 37(2): 304-311.
[36] Fitter A. Characteristics and functions of root systems//Plant Roots. Boca Raton: CRC Press, 2002: 15-32.
[37] 白雪, 赵成章, 康满萍. 金塔绿洲不同林龄多枝柽柳根系分叉数与分支角度的关系. 生态学报, 2021, 41(5): 1878-1884.
[38] Comas L, Eissenstat D. Linking fine root traits to maximum potential growth rate among 11 mature temperate tree species. Functional Ecology, 2004, 18(3): 388-397.
[39] 孙天雨. 黄土高原草地植物根系形态及生物量沿环境梯度的变化规律[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2021.
[40] 王丽娟. 胡杨(*Populus euphratica*)幼苗根系生长特征及影响因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
[41] Rewald B, Leuschner C. Does root competition asymmetry increase with water availability? Plant Ecology & Diversity, 2009, 2(3): 255-264.
[42] 李甜江. 中国沙棘人工林衰退的水分生理生态机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
[43] Yin Q L, Tian T T, Han X H, Xu J S, Chai Y F, Mo J, Lei M L, Wang L, Yue M. The relationships between biomass allocation and plant functional trait. Ecological Indicators, 2019, 102: 302-308.
[44] 曾凡江, 郭海峰, 刘波, 曾杰, 邢文娟, 张晓蕾. 多枝柽柳和疏叶骆驼刺幼苗生物量分配及根系分布特征. 干旱区地理, 2010, 33(1): 59-64.
[45] 单立山, 张希明, 花永辉, 魏疆, 闫海龙, 解婷婷. 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. 植物生态学报, 2007, 31(5): 769-776.
[46] 张晓蕾.塔干南缘骆驼刺和柽柳幼苗根系生长分布特征对不同水分处理的响应[D]. 新疆: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2010.