

高寒沙地 2 种锦鸡儿的根系分布

朱雅娟¹, 贾志清¹, 薛海霞²

(1. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 青海共和荒漠生态系统定位观测研究站, 北京 100091;
2. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091)

摘 要:中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿是共和盆地沙丘造林的主要树种。通过剖面法比较了 2 种锦鸡儿 10 年生人工林的不同级别的根系分布特征。结果表明:2 种锦鸡儿均为深根系植物,深度达到 1 m。中间锦鸡儿的根系生物量主要分布在 0~60 cm。其中,粗根、中根和细根分别主要分布在 0~30、0~60 cm 和 0~60 cm。然而,它的 3 个不同径级根系的长度分别主要分布在 0~30、0~50 cm 和 0~60 cm。柠条锦鸡儿的根系生物量主要分布在 0~90 cm。其中,粗根、中根和细根分别主要分布在 0~60、0~60 cm 和 0~90 cm。然而,它的 3 个不同径级根系的长度分别主要分布在 0~60、0~60 cm 和 0~70 cm。因此,中间锦鸡儿的根系相对较浅,适宜吸收降雨补充的浅层和中层土壤水分。柠条锦鸡儿的根系向更深的土壤中生长,吸收深层土壤水分。这反映了 2 种锦鸡儿对高寒沙地半干旱气候的适应差异。

关键词:中间锦鸡儿;柠条锦鸡儿;根系;生物量;根长

中图分类号:S727.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)02-0120-06

Root Distribution of Two Species of *Caragana* in Alpine Sandy Land

ZHU Ya-juan¹, JIA Zhi-qing¹, XUE Hai-xia²

(1. Institute of Desertification Studies, Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: *Caragana intermedia* and *C. korshinskii* are tow main shrubs used in the re-vegetation on sand dunes in Gonghe Basin. Root distribution characteristics of different types of two *Caragana* species were studied by profile method. The results showed that 10-years-old plantation of two species were deep-rooted, which was as deep as 1 m. The fresh and dry mass of *C. intermedia* distributed mainly in 0—60 cm, and the coarse roots, medium roots and fine roots distributed in 0—30, 0—40 and 0—60 cm depths, respectively. However, the length of different root types distributed in 0—30, 0—50 and 0—60 cm, respectively. The fresh and dry mass of *C. korshinskii* distributes mainly in 0—90 cm depth, and the coarse roots, medium roots and fine roots distributed in 0—60, 0—60, and 0—90 cm, respectively. However, the length of different types of *C. korshinskii* roots distributed in 0—60, 0—60 and 0—70 cm. Therefore, the relative shallower root system of *C. inermedia* was suitable to use soil water in shallow and medium depth; the root system of *C. konshinskii* grew to deeper depth to use deeper soil water, indicating the differences in the adaptation characteristics of two *Caragana* shrubs to semi-arid climate in alpine sandy land.

Key words: *Caragana intermedia*; *Caragana korshinskii*; root system; biomass; root length

共和盆地是青海省土地荒漠化比较严重的地区之一,位于青藏高原东北部,地处黄河上游地区。当地气候寒冷干燥,植被以草原为主。自然条件的恶劣,加上不合理的人类活动,包括农业人口增加,牲

畜数量增加和耕地面积增加等^[1],加上近年来气候暖干化,温度上升、降水波动^[2],导致土地沙化。为了治理沙化土地,人们通过建立草方格和粘土沙障,再播种中间锦鸡儿、柠条锦鸡儿或沙蒿种子,采用机械沙障和生物措施结合的方法,达到了比较好的效果。随着流沙的固定和植被的生长,当地的局部小气候得到明显改善^[3]。

研究表明,共和盆地5年生、9年生和25年生的中间锦鸡儿人工固沙林利用的主要水分来源均为10~50 cm土壤水分,主要由大气降水补充^[4-5]。随着植物的生长,中间锦鸡儿根系的吸收根(直径 ≤ 1 mm)和疏导根(直径 > 1 mm)的总生物量和总比根长显著增加。这3个林龄中间锦鸡儿的吸收根主要分布在10~30、10~50 cm和10~60 cm,疏导根则主要分布在10~50、10~60 cm和10~90 cm^[6]。但是,目前还没有见到对高寒沙地柠条锦鸡儿根系的相关研究。由于根系是植物吸收土壤水分的主要器官,在半干旱气候条件下,表层土壤水分波动剧烈,灌木的根系分布与其生存和发展关系密切。对于同属的2种灌木,它们的根系分布会有何不同,根据观察,柠条锦鸡儿的株高为2 m左右,接近中间锦鸡儿的2倍,因此假设它具有更深的根系以吸收比较稳定的深层土壤水分。通过比较2种锦鸡儿的根系分布,探讨它们对高寒沙地半干旱气候与沙质土壤的生态适应性,为人工固沙植被的管理提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在青海共和荒漠生态系统定位观测研究站进行。该站是国家林业局的中国荒漠生态系统研究网络的生态站之一。它位于青海省共和县沙珠玉乡(99°45′—100°30′E,36°03′—36°40′N,海拔2 871~3 870 m)。该地区具有显著的高原大陆性气候,年平均气温仅为2.4℃,年平均降水量为246.3 mm,年平均潜在蒸发量为1 716.7 mm,属于半干旱区。年平均无霜期日数仅为91 d;年平均大风日数为50.6 d,年平均沙尘暴日数为20.7 d;风向主要为西、西北风,年平均风速为2.7 m·s⁻¹。地带性土壤是栗钙土和棕钙土,非地带性土壤是风沙土和草甸土。研究区内的植被以人工植被为主,乔木有小叶杨(*Populus simonii*)与青杨(*Populus cathayana*),灌木有中间锦鸡儿(柠条,*Caragana intermedia*)、柠条锦鸡儿(白柠条,*Caragana korshinskii*)、黑沙蒿(油蒿,*Artemisia ordosica*)、乌柳(*Salix cheilophila*)和沙柳(*Salix psammophila*)等。天然

植被主要有川青锦鸡儿(*Caragana tibetica*)灌丛、唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛以及芨芨草(*Achnatherum splendens*)和针茅(*Stipa* spp.)草原等。

1.2 根系采样方法

2种锦鸡儿均为2004年造林。2003年春季在流动沙丘上铺设粘土沙障,规格为1 m×1 m。2004年春季第一场雨后在每个沙障中心位置挖穴点播锦鸡儿种子,每穴5粒。在每个锦鸡儿人工林内分别设置3个样地,面积为5 m×5 m,样地间隔10 m。在每个样地内分别测量5棵锦鸡儿的株高和冠幅。中间锦鸡儿的平均株高为(101.25±15.28) cm,平均冠幅为(144.31±37.73)×(142.75±36.88) cm。柠条锦鸡儿的平均株高为198.25±28.08 cm,平均冠幅为(123.69±31.12)×(115.44±23.27) cm。

2014年7月中旬,分别在中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿人工林内通过剖面法挖掘根系。在3个样地中心距离锦鸡儿植株5 cm处设置50×50 cm的小样方,每10 cm一层进行挖掘,直至根系肉眼不可见为止。2种锦鸡儿的最大挖掘深度均为100 cm。用直径1 mm的筛子筛出所有根系,再用自封袋带回实验室,用游标卡尺测量根系的直径,分为粗根(> 5 mm)、中根(1~5 mm)和细根(< 1 mm)3个径级,分别用卷尺测量根系的长度(m),然后再用电子天平(0.01 g)测量鲜重(g)。将分级后的根系装在纸袋中,在75℃下干燥24 h,达到恒重后用电子天平(0.01 g)测量干重(g)。

1.3 数据处理

计算根系的比根长SRL(specific root length)= L/W 。其中, L 是根系长度(m), W 是根系干重(g)。根系的鲜重、干重、长度和比根长均用平均值±标准差(mean±SE)表示。通过单因素方差分析法(ANOVA)分析土壤深度对2种锦鸡儿的根系鲜重、干重、长度和比根长的影响是否显著。如果显著,再用Tukey's多重比较分析不同深度之间的差异性。数据处理用SPSS17.0软件完成。

2 结果与分析

2.1 2种锦鸡儿的根系生物量

中间锦鸡儿的3个径级的根系鲜重随着深度变化显著($p<0.01$, $p<0.01$, $p=0.001$)。中间锦鸡儿的粗根(直径 > 5 mm)鲜重主要分布在0~30 cm,占粗根总量的74.32%(图1A)。中根(直径1~5 mm)鲜重主要分布在0~40 cm,占中根总量的70.61%。细根(直径 < 1 mm)鲜重主要分布在0~60 cm,占细根总量的80.83%。整体上,中间锦

鸡儿在 0~60 cm 的根系占其总鲜重的 87.46% (表 1)。柠条锦鸡儿的 3 个径级的根系鲜重随着深度变化显著($p<0.01$, $p<0.05$, $p<0.01$)。柠条锦鸡儿的粗根(直径 >5 mm)鲜重主要分布在 0~60 cm, 占粗根总量的 94.67% (图 1B)。中根(直径 1~5

mm)鲜重主要分布在 0~60 cm, 占中根总量的 83.63%。细根(直径 <1 mm)鲜重主要分布在 0~90 cm, 占细根总量的 98.75%。整体上, 柠条锦鸡儿在 0~90 cm 的根系占其总鲜重的 98.20% (表 1)。

表 1 不同深度 2 种锦鸡儿的根系总生物量

Table 1 Total root biomass of two species of *Caragana* in different depths

物种	鲜重/g		干重/g	
	中间锦鸡儿	柠条锦鸡儿	中间锦鸡儿	柠条锦鸡儿
0~10 cm	173.25±17.47 b	48.10±3.26 ab	97.92±5.02 ab	24.19±2.06 ab
10~20 cm	291.19±26.85 c	157.94±9.20 bc	183.43±10.25 ab	81.48±11.35 bc
20~30 cm	341.34±24.39 c	194.60±25.49 c	196.95±18.04 b	106.53±13.57 c
30~40 cm	186.23±24.28 b	153.12±10.17 bc	112.41±17.12 ab	82.37±5.78 bc
40~50 cm	83.11±14.00 ab	147.60±12.44 bc	56.76±6.49 ab	78.37±7.02 bc
50~60 cm	88.30±15.08 ab	120.92±12.94 bc	54.88±6.32 ab	66.50±5.12 bc
60~70 cm	77.59±17.49 ab	56.57±4.20 ab	43.18±8.98 ab	30.27±4.48 ab
70~80 cm	62.94±15.58 ab	27.79±3.13 ab	35.50±4.12 ab	15.96±3.36 ab
80~90 cm	17.48±5.93 a	29.97±2.65 ab	11.60±1.15 a	16.95±2.59 ab
90~100 cm	8.86±2.34 a	17.13±1.18 a	5.84±0.56 a	9.32±2.21 a
总计	1 330.62±48.37	953.74±45.95	798.47±46.95	511.94±37.72

注:根据 Tukey's 检验,不同小写字母表示根系在不同深度之间的鲜重或干重差异显著($p<0.05$)。图 1~图 4 同。

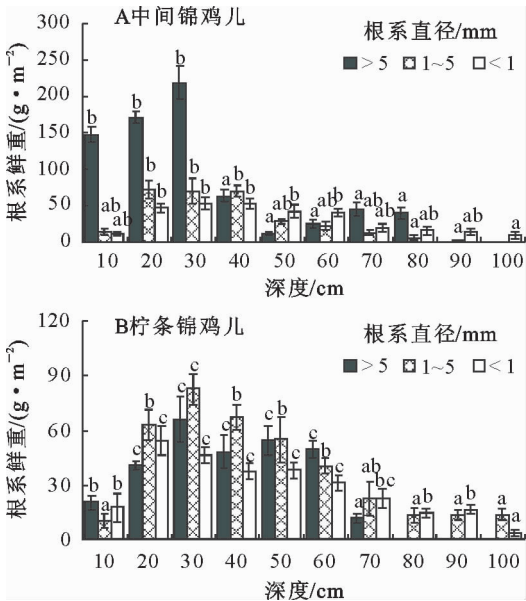


图 1 不同深度 2 种锦鸡儿的根系鲜重
Fig. 1 Fresh mass of two species of *Caragana* in different depths

中间锦鸡儿的 3 个径级的根系干重随着深度变化显著($p<0.01$, $p<0.01$, $p=0.001$)。中间锦鸡儿的粗根干重(直径 >5 mm)主要分布在 0~30 cm, 占粗根总量的 75.78% (图 2A)。中根(直径 1~5 mm)干重主要分布在 0~40 cm, 占中根总量的 74.41%。细根(直径 <1 mm)干重主要分布在 0~60 cm, 占细根总量的 81.84%。整体上, 中间锦鸡儿在 0~60 cm 的根系占其总干重的 87.96% (表 1)。柠条锦鸡儿的 3 个径级的根系干重随着深度变

化显著($p<0.01$, $p<0.05$, $p<0.01$)。柠条锦鸡儿的粗根(直径 >5 mm)干重主要分布在 0~60 cm, 占粗根总量的 96.11% (图 2B)。中根(直径 1~5 mm)干重主要分布在 0~60 cm, 占中根总量的 82.93%。细根(直径 <1 mm)干重主要分布在 0~90 cm, 占细根总量的 98.90%。整体上, 柠条锦鸡儿在 0~90 cm 的根系占其总干重的 98.18% (表 1)。

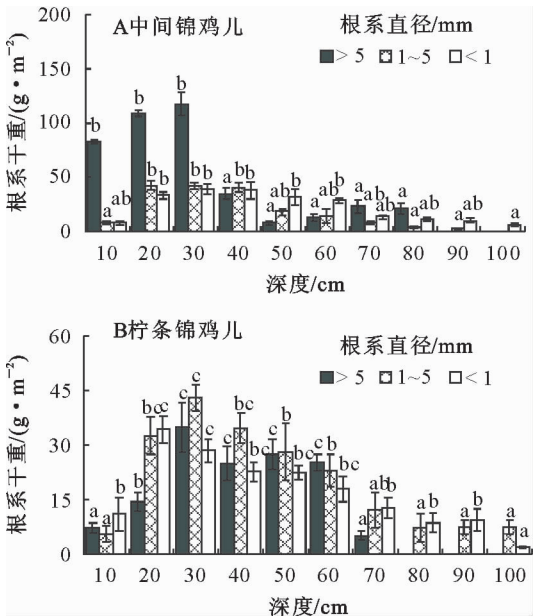


图 2 不同深度 2 种锦鸡儿的根系干重
Fig. 2 Dry mass of two species of *Caragana* in different depths

2.2 2 种锦鸡儿的根系长度

中间锦鸡儿的 3 个径级的根系长度随着深度变

化显著($p<0.01$, $p=0.001$, $p=0.001$)。中间锦鸡儿的粗根(直径 >5 mm)长度主要分布在 0~30 cm,占粗根总量(1.86 m)的 68.46%(图 3A)。中根(直径 1~5 mm)长度主要分布在 0~50 cm,占中根总量(6.12 m)的 77.17%。细根(直径 <1 mm)长度主要分布在 0~60 cm,占细根总量(21.71 m)的 75.33%。柠条锦鸡儿的 3 个级别的根系长度都受到深度的显著影响($p<0.01$, $p<0.01$, $p=0.001$)。柠条锦鸡儿的粗根(直径 >5 mm)长度主要分布在 0~60 cm,占粗根总量(1.11 m)的 84.04%(图 3B)。中根(直径 1~5 mm)长度主要分布在 0~60 cm,占中根总量(7.98 m)的 85.62%。细根(直径 <1 mm)长度主要分布在 0~70 cm,占细根总量(17.65 m)的 91.27%。

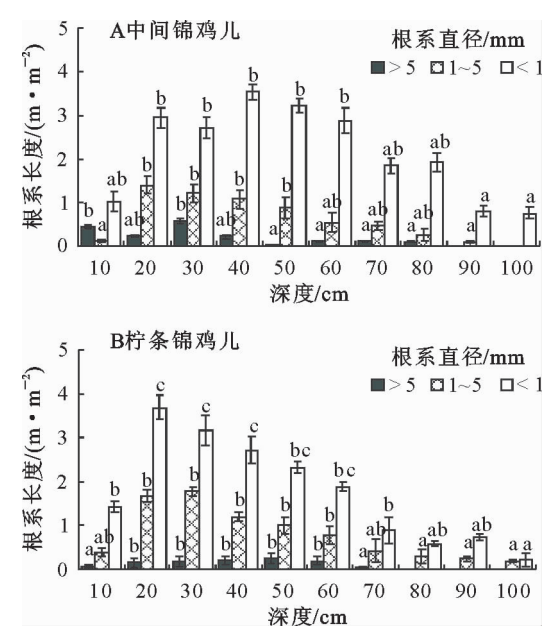


图3 不同深度 2 种锦鸡儿的根系长度

Fig. 3 Root length of two species of *Caragana* in different depths

2.3 2 种锦鸡儿的比根长

中间锦鸡儿的粗根和细根的比根长随着深度变化不显著($p>0.05$),然而它的中根的比根长随着深度变化显著($p<0.05$)。中间锦鸡儿的粗根(直径 >5 mm)比根长的范围为 0.05~0.08 (图 4A)。中根(直径 1~5 mm)在 70~80 cm (0.70)的比根长显著大于 0~10 cm (0.22)。细根(直径 <1 mm)的比根长范围为 0.95~1.71。柠条锦鸡儿的粗根和细根的比根长随着深度变化不显著,然而它的中根的比根长则随着深度变化显著($p<0.05$)。柠条锦鸡儿的粗根(直径 >5 mm)的比根长范围为 0.07~0.09 (图 4B)。中根(直径 1~5 mm)在表层 0~10 cm 的比根长(0.72)显著高于 60~70 cm (0.31)、80~90 cm (0.32)和 90~100 cm (0.26)。

细根(直径 <1 mm)的比根长范围为 0.95~1.28。

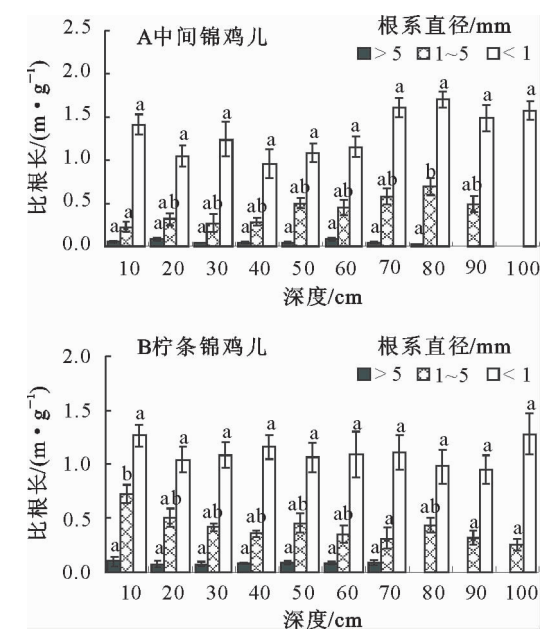


图4 不同深度 2 种锦鸡儿的比根长

Fig. 4 Specific root length of two species of *Caragana* in different depths

3 结论与讨论

根系是植物吸收水分和养分的主要器官。在干旱区和半干旱区,植物的根系主要有 3 种类型。第 1 种是深根系,主根发达,其垂直深度大于水平长度,主要吸收土壤深层水分,甚至地下水,包括乔木和部分灌木,例如乔木胡杨(*Populus euphratica*)^[7],以及灌木多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)^[8]和骆驼刺(*Alhagi spasiifolia*)^[9]等。第 2 种是浅根系,其水平长度大于垂直深度,主要吸收土壤浅层水分,包括部分灌木和草本植物,例如白皮沙拐枣(*Calligonum leucocladum*)^[10]、红砂(*Reaumuria soongorica*)^[8]和沙柳^[11]等。第 3 种是双型根系,同时具有发达的水平根系和垂直根系,雨季时吸收降雨补充的浅层土壤水分,旱季时吸收深层土壤水分,例如梭梭(*Haloxylon ammodendron*)^[8]。

本研究表明,共和盆地沙丘上生长的 10 年生中间锦鸡儿和柠条锦鸡儿均为深根系植物。其中,中间锦鸡儿的粗根、中根和细根的最大深度分别达到 80、90 cm 和 100 cm。前人研究表明,黄土丘陵沟壑区中间锦鸡儿的根系可塑性比较强。在风沙土基质的阳坡,根系生物量最高,单株平均值为 921.10 g;而且根系水平分布最广,达到 7.0~8.0 m;生长优于其他生境。在栗钙土基质的丘顶,根系生物量次之,单株平均值为 761.95 g;而且入土最深,达到 5.0~6.1 m^[12]。在本研究中,柠条锦鸡儿的粗根、

中根和细根的最大深度分别达到 70、90 cm 和 100 cm。前人研究表明:柠条锦鸡儿的根系分布特征具有一定的地理差异。这可能与降水等气候因素有关。例如,毛乌素沙地的柠条锦鸡儿的水平根系主要分布在距离树基 60 cm 范围内,占总根量的 78.58%;其垂直分布在 30~90 cm 之间^[13]。本文关于柠条锦鸡儿根系分布深度的研究结果与半干旱区的毛乌素沙地类似。腾格里沙漠的 15 年生柠条锦鸡儿的主根主要分布在 0.4 m 以内,其水平根系的长度和重量分别集中在主干周围 0.6 m 和 0.4 m 以内^[14]。因此,在更干旱的地区,柠条锦鸡儿的根系分布可能较浅。

在干旱区生态系统中,水分是决定植物根系类型的主要环境因子。如果植物以比较稳定的深层土壤水分为主要水源,则为深根系;如果植物以脉冲式降水为主要水源,则为浅根系^[15]。另外,土壤类型和土壤水分也影响植物根系分布。例如,在石羊河流域,粘土层以上靠近粘土层植物的根系密度增大,粘土层以下运离粘土层根系密度先增加再减少。但是,不同植物表现出该规律的根系级别不同。梭梭为直径<1 mm 根系,怪柳和白刺(*Nitraria tangutorum*)则为直径 1~2 mm 和 2~5 mm 根系^[16]。黄土高原北缘的 20 年生柠条锦鸡儿在黄土和沙土中分别有 70.7%和 96.6%的细根面积密度分布在 1 m 以内^[17]。黄土高原(陕北安塞县)不同立地条件下柠条锦鸡儿的根系生物量分别为:阳坡>半阳坡>峁顶>半阴坡>阴坡^[18]。在安塞县的纸坊沟流域,山坡上 30 年生柠条锦鸡儿的根系在 6~30 cm 最密集,而山坡下的根系在 6~20 cm 最密集^[19]。科尔沁沙地的天然小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛的根系主要分布在 1 m 以内。其中,19 年人工林的吸收根主要分布在 40~90 cm,而且吸收根下层的土壤含水量锐减;而 4 年人工林的吸收根主要分布在 20~60 cm^[20]。在科尔沁沙地的半固定沙丘上,差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*)的活根生物量在坡中和坡顶主要分布在 0~20 cm,而在坡底和背风坡的垂直分布比较均匀^[21]。盆栽试验表明:干旱时锦鸡儿(*Caragana sinica*)的根系干重增加 136.52%,根冠比增加 233.43%,根长增加 38.84%^[22]。此外,人工林的林带结构也可能影响根系分布。例如,在内蒙古四子王旗,12 年生小叶锦鸡儿林为两行一带,行间距 1 m,其带间距影响根系分布。在 5 m 和 10 m 带间距下,根系水平分布随着远离林带而减少,而 16 m 带间距下呈波状变化^[23]。在华北低丘山区,决明子(*Triticum aestivum*)在单作或者与核桃(*Juglans rigia*)间作时的

根长密度和根系生物量差异不大,但是单作的根系直径比间作大^[24]。

在共和盆地的沙丘上,10 年生中间锦鸡儿的根系生物量主要分布在 0~60 cm,其粗根、中根和细根分别主要分布在 0~30、0~60 cm 和 0~60 cm。然而,它们的长度分别主要分布在 0~30、0~50 cm 和 0~60 cm。10 年生柠条锦鸡儿的根系生物量主要分布在 0~90 cm,其粗根、中根和细根分别主要分布在 0~60、0~60 cm 和 0~90 cm。然而,它们的长度分别主要分布在 0~60、0~60 cm 和 0~70 cm。中间锦鸡儿的根系相对较浅,因此主要吸收降雨补充的浅层和 中层土壤水分^[4-5]。柠条锦鸡儿的根系向更深的土壤中生长,可能主要吸收比较稳定的深层土壤水分。不同的根系分布特征反映了 2 种锦鸡儿对高寒沙地半干旱气候的适应差异。今后需要进一步通过稳定氢氧同位素技术研究柠条锦鸡儿在不同季节利用的水分来源。

参考文献:

[1] 杨世琦,高旺盛,隋鹏,等. 共和盆地土地沙漠化因素定量研究[J]. 生态学报,2005,25 (12):3181-3187.
YANG S Q,GAO W S,SUI P,*et al.* Quantitative research on factors of soil desertification in Gonghe Basin [J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25 (12):3181-3187. (in Chinese)

[2] 金元锋,丁生祥,张富翔,等. 近 50 年共和盆地土地荒漠化与气候变化的关系及其影响因子定量分析[J]. 现代农业科技,2008,37 (1):189-192.

[3] 朱雅娟,李虹,赵淑伶,等. 共和盆地不同类型防护林的改善小气候效应[J]. 中国沙漠,2014,34 (3):841-848.
ZHU Y J,LI H,ZHAO S L,*et al.* Improvement effect on microclimate in different types of shelterbelt in the Gonghe Basin of Tibet Plateau [J]. Journal of Desert Research,2014,34 (3): 841-848. (in Chinese)

[4] JIA Z,ZHU Y,LIU L. Different water use strategies of juvenile and adult *Caragana intermedia* plantations in the Gonghe Basin, Tibet Plateau [J]. PLoS ONE,2012,7 (9):e45902.

[5] 刘丽颖,贾志清,朱雅娟,等. 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿的水分利用策略[J]. 干旱区资源与环境,2012,26 (5):122-128.
LIU L Y,JIA Z Q,ZHU Y J,*et al.* Water use strategy of different stand ages of *Caragana intermedia* in alpine sandland [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012, 26 (5):122-128. (in Chinese)

[6] 刘丽颖,贾志清,朱雅娟,等. 共和盆地中间锦鸡儿人工林根系的分布特征[J]. 中国沙漠,2012,32 (6):1626-1631.
LIU L Y,JIA Z Q,ZHU Y J,*et al.* Root system distribution of *Caragana intermedia* plantation in Gonghe Basin, Qinghai Province [J]. Journal of Desert Research,2012,32 (6):1626-1631. (in Chinese)

[7] 叶茂,徐海量,王晓峰,等. 塔里木河下游阿拉干断面胡杨根系空间分布规律研究[J]. 西北植物学报,2011,31 (4):801-807.
YE M,XU H L,WANG X F,*et al.* Spatial distribution charac-

teristics of root system of *Populus euphratica* in the Algan transection of the lower Tarim River [J]. *Acta Botanica Bore-al-Occident Sinica*,2011,31 (4):801-807. (in Chinese)

[8] 徐贵青,李彦.共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应[J].*生态学报*,2009,29 (1):130-137.

XU G Q,LI Y. Roots distribution of tree desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2009,29 (1):130-137. (in Chinese)

[9] 张利刚,曾凡江,袁娜,等.不同水分条件下疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)生长及根系分株构型特征[J].*中国沙漠*,2013,33 (3):717-723.

ZHANG L G,ZENG F J,YUAN N,*et al.* Root growth and ra-mets architecture characteristics of *Alhagi sparsifolia* under different water treatments [J]. *Journal of Desert Research*, 2013,33 (3):717-723. (in Chinese)

[10] 李海涛.白皮沙拐枣(*Calligonum leucocladium*)根系与环境关系的初步研究[J].*新疆农业大学学报*,1996,19 (1):56-61.

[11] 刘健,贺晓,包海龙,等.毛乌素沙地沙柳细根分布规律与土壤水分分布的关系[J].*中国沙漠*,2010,30 (6):1362-1366.

LIU J,HE X,BAO H L,*et al.* Distribution of fine roots of *Salix psammophila* and its relationship with soil moisture in Mu Us Sandland [J]. *Journal of Desert Research*,2010,30 (6):1362-1366. (in Chinese)

[12] 尹建华,包铁军,杨劼.黄土丘陵沟壑区中间锦鸡儿的生长特征[J].*内蒙古大学学报:自然科学版*,2014,56 (5):526-533.

YIN J H,BAO T J,YANG J. Growth characteristics of *Car-a-gana intermedia* in the loess hilly-gully region [J]. *Journal of Inner Mongolia University; Nat. Sci. Edi.* ,2014,56 (5):526-533. (in Chinese)

[13] 张莉,吴斌,丁国栋,等.毛乌素沙地沙柳与柠条根系分布特征对比[J].*干旱区资源与环境*,2010,24 (3):158-161.

ZHANG L,WU B,DING G D,*et al.* Root distribution charac-teristics of *Salix psammophylla* and *Caragana korshinskii* in Mu Us sandy land [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2010,24 (3):158-161. (in Chinese)

[14] ZHANG Z S,LI X R,LIU L C,*et al.* Distribution,biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana kor-shinskii* in the Tengger Desert,northwestern China [J]. *Journal of Plant Research*,2009,122:109-119.

[15] SCHWINNING S,EHLERINGER J R. Water use trade-off and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystem [J]. *Journal of Ecology*,2001,89:464-480.

[16] 柴成武,徐先英,唐卫东,等.石羊河流域荒漠区主要固沙植物根系研究[J].*西北林学院学报*,2009,24 (4):21-26.

CHAI C W,XU X Y,TANG W D,*et al.* Root system of the main sand fixing plants in desert zone of Shiyang River Basin [J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2009,24 (4): 21-26. (in Chinese)

[17] CHENG X,HUANG M,SHAO M,*et al.* A comparison of fine root distribution and water consumption of mature *Car-a-gana korshinkii* Kom grown in two soils in a semiarid region, China [J]. *Plant and Soil*,2009,315:149-161.

[18] 毕建琦,杜峰,梁宗锁,等.黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究[J].*林业科学研究*,2006,19 (2):225-230.

BI J Q,DU F,LIANG Z S,*et al.* Research on root system of *Caragana korshinskii* at different site conditions in the hilly regions of Loess Plateau [J]. *Forest Research*,2006,19 (2): 225-230. (in Chinese)

[19] 孙黎黎,张文辉,何景峰,等.黄土高原丘陵沟壑区不同生境条件下柠条人工种群无性繁殖与更新研究[J].*西北林学院学报*,2010,25 (1):1-6.

SUN L L,ZHANG W H,HE J F,*et al.* Asexual reproduction and regeneration of artificial *Caragana korshinskii* population in different habitats in hilly area of the Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2010,25 (1):1-6. (in Chinese)

[20] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁璠.沙地人工小叶锦鸡儿植被根系分布与土壤水分关系研究[J].*水土保持学报*,2003,17 (3):78-81.

ALAMUSA,JIANG D M,PEI T P. Relationship between root system distribution and soil moisture of artificial *Car-a-gana microphylla* vegetation in sandy land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2003,17 (3):78-81. (in Chinese)

[21] 罗永清,赵学勇,周欣,等.不同生境中差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*)生长特征及地下生物量分布[J].*中国沙漠*, 2015,35 (1):152-159.

LUO Y Q,ZHAO X Y,ZHOU X,*et al.* Growth character and belowground biomass distribution of *Artemisia halodendron* in different positions of sand dune [J]. *Journal of Desert Re-search*,2015,35 (1):152-159. (in Chinese)

[22] 邱权,李吉跃,王军辉,等.干旱胁迫下青藏高原 4 种灌木生物量和根系变化[J].*西北林学院学报*,2013,28 (3):1-6.

QIU Q,LI J Y,WANG J H,*et al.* Biomass and root system characteristics and drought resistance of 4 shrubs in Tibetan Plateau under drought stress [J]. *Journal of Northwest For-estry University*,2013,28 (3):1-6. (in Chinese)

[23] 叶冬梅,德永军,赵翠平,等.带状柠条林灌草根系质量空间分布格局[J].*内蒙古农业大学学报*,2009,30 (1):101-104.

YE D M,DE Y J,ZHAO C P,*et al.* Spatial distribution struc-ture of root mass of *Caragana* and grass compund model with different spacing [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*,2009,30 (1):101-104. (in Chinese)

[24] 何春霞,孟平,张劲松,等.华北低丘山区核桃-决明子复合模式的根系分布[J].*林业科学研究*,2013,26 (6):715-721.

HE C X,MENG P,ZHANG J S,*et al.* Root spatial distribu-tion of walnut/cassia agroforestry system in the rocky hilly area of North China [J]. *Forestry Research*,2013,26 (6): 715-721. (in Chinese)