

DOI: 10.5846/stxb201910282259

朱雅娟, 崔清国, 杜娟, 许素寒, 刘志兰. 毛乌素沙地三种灌木群落的水分利用过程. 生态学报, 2020, 40(13): 4470-4478.

Zhu Y J, Cui Q G, Du J, Xu S H, Liu Z L. Water use of three shrub communities in Mu Us Sandy Land. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4470-4478.

## 毛乌素沙地三种灌木群落的水分利用过程

朱雅娟<sup>1,\*</sup>, 崔清国<sup>2</sup>, 杜娟<sup>2</sup>, 许素寒<sup>1</sup>, 刘志兰<sup>2</sup>

1 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

2 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

**摘要:**沙地柏、黑沙蒿和沙柳是毛乌素沙地的 3 种优势灌木群落。利用稳定同位素技术研究了 3 种灌木及伴生植物杨柴主要利用的水分来源, 结合叶片稳定碳同位素值与土壤水分监测, 从而确定灌木群落如何利用水分。结果表明: 7 月和 9 月 3 种群落内浅层土壤水的稳定氧同位素值接近雨水。沙地柏 5 月主要利用 25 cm 浅层土壤水, 而 7 月和 9 月主要利用 10—25 cm 浅层和 100—200 cm 深层土壤水。黑沙蒿和伴生的杨柴 5 月主要利用 10 cm 浅层土壤水, 7 月同时利用 10 cm 浅层土壤水和 150 cm 深层土壤水, 9 月则利用 10—150 cm 土壤水。沙柳 5 月主要利用 10—25 cm 浅层土壤水, 伴生的杨柴主要利用 50—200 cm 土壤水; 7 月它们同时利用 10—25 cm 浅层土壤水和 100—200 cm 深层土壤水; 9 月都主要利用 25—200 cm 土壤水。4 种植物的叶片稳定碳同位素值存在季节动态和种间差异。常绿灌木沙地柏的叶片碳同位素值比较稳定, 而且高于其他 3 种落叶灌木和半灌木。5 月浅层土壤含水量较低时 3 种落叶植物的叶片碳同位素值较高。因此, 降雨补充的浅层土壤水是 3 种灌木群落利用的主要水分来源。3 种灌木及其伴生植物根据不同深度土壤水的可利用性, 在不同季节利用不同深度的土壤水。杨柴与黑沙蒿或沙柳均存在水分竞争。沙地柏的叶片稳定碳同位素值较高, 干旱时具有竞争优势。干旱时落叶灌木和半灌木能够提高叶片稳定碳同位素值来适应环境。

**关键词:**沙地柏; 黑沙蒿; 沙柳; 水分来源; 稳定碳同位素

## Water use of three shrub communities in Mu Us Sandy Land

ZHU Yajuan<sup>1,\*</sup>, CUI Qingguo<sup>2</sup>, DU Juan<sup>2</sup>, XU Suhan<sup>1</sup>, LIU Zhilan<sup>2</sup>

1 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

**Abstract:** In Mu Us Sandy Land, *Sabina vulgaris*, *Artemisia ordosica*, and *Salix psammophila* are the three dominant shrub communities. The water source of the three dominant shrubs and the associated shrub *Hedysarum laeve* were investigated by stable isotope technology, and leaf stable carbon isotope composition and soil water dynamics were monitored to clarify how these shrub communities utilize water. The results showed that the  $\delta^{18}\text{O}$  of shallow soil water in shrub communities was similar to that of rainwater in July and September. *S. vulgaris* mainly used shallow soil water (25 cm) in May, and mainly used both shallow (10—25 cm) and deep (100—200 cm) soil water in July and September. *A. ordosica* and its associated plant *H. laeve* mainly used surface soil water (10 cm) in May, but used surface soil water and deep soil water in July (10 cm and 150 cm) and water from the total soil profile (10—150 cm) in September. *S. psammophila* mainly used shallow soil water (10—25 cm) in May, whereas its associated plant *H. laeve* mainly used deep soil water (50—200 cm); in contrast, both used shallow and deep soil water in July (10—25 cm and 100—200 cm) and in September (25—200 cm). There were seasonal and inter-specific variances among leaf  $\delta^{13}\text{C}$  value of the four plants. The evergreen shrub *S. vulgaris* had a constant leaf  $\delta^{13}\text{C}$  value, which was higher than for the three deciduous shrubs. The leaf  $\delta^{13}\text{C}$  value of three deciduous

基金项目: 国家重点研发计划项目专题(2017YFC050450202)

收稿日期: 2019-10-28; 修订日期: 2019-11-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuyj@caf.ac.cn

plants was higher in May when the soil water content was lower at a shallow depth. Therefore, shallow soil water that was recharged by rainwater was the main water source for three shrub communities. Based on the availability of soil water, the three shrub communities utilized different depths of soil water in different seasons. There was water competition between *H. laeve* and *A. ordosica* or *S. psammophila*. The evergreen shrub *S. vulgaris* had a higher leaf stable carbon isotope composition, which may confer a competitive advantage. Deciduous shrubs or semi-shrubs may adapt to the environment by enhancing leaf  $\delta^{13}\text{C}$  value during drought.

**Key Words:** *Sabina vulgaris*; *Artemisia ordosica*; *Salix psammophila*; water source; stable carbon isotope

在半干旱区,水分是植物群落生存和发展的关键因子<sup>[1]</sup>。植物如何利用有限的水分,不仅关系到自身生存,而且影响种间关系和群落动态。稳定同位素技术研究表明:半干旱区植物可以利用的水分来源主要有降雨补充的浅层土壤水<sup>[2]</sup>,降雨或降雪补充的深层土壤水<sup>[3]</sup>以及地下水<sup>[4-9]</sup>。不同生活型的植物一般利用不同来源的水分,这与它们的根系类型有关。一般地,乔木和深根系灌木能够利用深层土壤水或地下水<sup>[5]</sup>;双型根系乔木或灌木能够同时利用不同深度的土壤水或地下水<sup>[8]</sup>;浅根系灌木和多年生草本植物利用浅层或中层土壤水<sup>[10]</sup>。影响植物利用水分来源的主要环境因素有季节变化<sup>[5-6]</sup>、气候年际差异<sup>[7]</sup>和生境异质性<sup>[11]</sup>等。浅层土壤水一般来源于降雨,深层土壤水则来自降雨、降雪或者地下水。此外,对于  $\text{C}_3$  植物而言,叶片的稳定碳同位素值和长期水分利用效率成正相关。干旱时一些植物可以通过提高水分利用效率来适应环境变化<sup>[12]</sup>。

毛乌素沙地是我国四大沙地之一,位于内蒙古自治区中部、陕西北部和宁夏东北部,地处鄂尔多斯高原向黄土高原的过渡区,也是半干旱区向干旱区的过渡带。它的总面积是 4.22 万  $\text{km}^2$ ,海拔 1000—1600 m。该地区属于中温带气候,年均气温 6.0—8.5 $^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量从东南部的 440 mm 降低到西北部的 250 mm,降雨集中在 7—9 月;年均潜在蒸发量 1800—2500 mm。毛乌素沙地的天然植被主要包括森林草原、草原、沙地灌丛和荒漠草原,以及滩地的草甸、盐碱地与沼泽。其中,沙地灌丛的优势种有沙地柏(*Sabina vulgaris*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)和中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)等<sup>[13]</sup>。地带性土壤有淡栗钙土、棕钙土和风沙土<sup>[14]</sup>。

以往研究表明:毛乌素沙地的沙地柏利用 0—1.5 m 土壤水和地下水,而半灌木黑沙蒿主要利用 0.5 m 以内的浅层土壤水<sup>[6]</sup>。黑沙蒿主要利用 65 mm 大雨补充的深层土壤水,多年生草本老瓜头(*Cynanchum komarovii*)主要利用 10—20 mm 中雨,而本氏针茅(*Stipa bungeana*)主要利用小雨补充的浅层土壤水<sup>[2]</sup>。然而,前者只采集了一次样品,比较了不同植物水分利用过程的种间差异;后者关注的是降雨后不同植物的水分利用过程,对于当地植物水分利用过程的季节动态还未见报道。毛乌素沙地地处半干旱区,降雨和土壤水分的季节变化较大,生长季内植物如何调整水分利用策略适应沙地的半干旱环境?因此,本文通过研究沙地柏、黑沙蒿和沙柳 3 种灌木群落水分利用过程的季节动态,以期理解它们如何调整利用的水分来源适应当地的半干旱环境。研究结果能够为当地的天然林保护、退耕还林和三北防护林工程等生态林业工程提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区简介

研究地点是中国科学院鄂尔多斯沙地草地生态站(39 $^{\circ}$ 29'37.6"N, 110 $^{\circ}$ 11'29.4"E, 1300 a.s.l.),地处毛乌素沙地东北缘,位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗纳林陶亥镇(图 1)。该站的年均气温是 5.0—8.5 $^{\circ}\text{C}$ ,最低气温-28 $^{\circ}\text{C}$ ,最高气温 40 $^{\circ}\text{C}$ ;年均降水量是 350 mm,集中在 7 月到 9 月;年均潜在蒸发量是 2300 mm<sup>[15]</sup>。主要植被类型为沙地灌丛,优势种包括灌木沙地柏、沙柳和半灌木黑沙蒿等,伴生植物包括半灌木杨柴(*Hedysarum laeve*),多年生草本植物赖草(*Leymus secalinus*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)以及一年生植物雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、兴安虫实

(*Corispermum chinganicum*) 和虎尾草 (*Chloris virgata*) 等。土壤类型主要是风沙土。

## 1.2 研究方法

2018年5月13日—5月14日、7月13日—7月14日和9月22日,分别在沙地柏、黑沙蒿和沙柳群落中采集植物和土壤样品。设置4个5 m × 5 m的样方作为重复,每个样方间距10 m。在每个样方内测量4株灌木的株高、冠幅,估计盖度,记录伴生植物种类。3种灌木群落的特征见表1。在每个样方中采集4—5株灌木的两年生枝条,长度为5 cm,直径4—5 mm,用枝剪除去韧皮部,将木质部装入透明螺纹口8 mL玻璃样品瓶(德国CNW技术公司),用Parafilm封口膜(美国American National Can公司)密封后冷藏带回实验室。伴生植物杨柴采集根系与枝条连接处的木质化部分。其他几种伴生植物数量很少,没有采集植物样品。在每个样方中用直径5.72 cm的沙土钻(美国AMS公司)采集土壤样品。根据以往研究,毛乌素沙地的沙地柏侧根细根主要分布在0—30 cm,最大深度为90 cm<sup>[16]</sup>;沙柳的细根垂直分布深度为1.5 m<sup>[17]</sup>;黑沙蒿的细根分布深度为1.4 m<sup>[18]</sup>。因此,本研究确定灌木沙地柏和沙柳的采样深度是10,25,50,100,150 cm和200 cm;半灌木黑沙蒿的采样深度是10,25,50,75,100 cm和150 cm。土壤样品装入8 mL玻璃样品瓶,用封口膜密封后冷藏带回实验室。木质部和土壤样品在-18℃冰柜冷冻保存。实验期间采集自然降雨的雨水,密封在8 mL玻璃样品瓶中冷藏带回实验室,在2℃冰箱中冷藏保存。由于研究区地处赛蒙特煤矿的开采区,2012年采煤后浅层地下水流失,深层地下水埋深超过70 m,对植被的影响很小,因此没有采集地下水样品。植物和土壤样品在清华大学地学中心的稳定同位素实验室通过LI-2000植物土壤水分真空抽提系统提出水分,雨水样品用滤纸过滤除去杂质后测定。由于专题经费有限,考虑到半干旱区水分子中的氧原子相对更稳定,本研究只测定了样品的稳定氧同位素。水样品在Flash 2000 HT元素分析仪中高温裂解后分别生成CO和H<sub>2</sub>,Finnigan MAT 253质谱仪通过检测CO的<sup>18</sup>O与<sup>16</sup>O比率,并与国际标准海水(Standard mean ocean water, SMOW)比对后计算出样品的δ<sup>18</sup>O值。

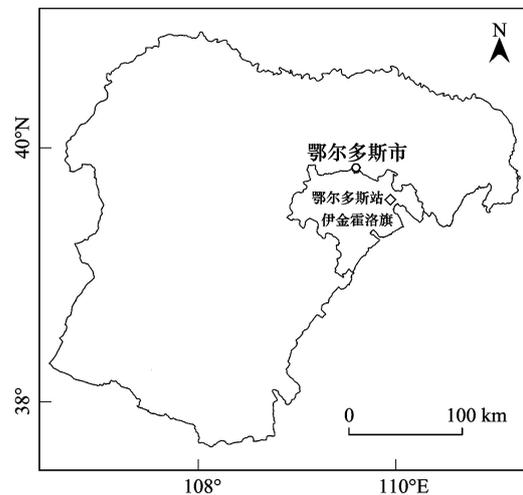


图1 鄂尔多斯生态站位置示意图

Fig.1 The location of Ordos Ecological Station

表1 毛乌素沙地3种灌木的群落特征

Table 1 Community characteristic of three shrubs in Mu Us Sandy Land

群落名称 Community	株高/cm Height	冠幅/cm Crown diameter	盖度/% Coverage	伴生植物 Associated species
沙地柏 Sv	78.13	—	71.25	赖草 Ls、假苇拂子茅 Cp
黑沙蒿 Ao	92.19	136.00 × 131.94	67.50	杨柴 Hl、星星草 Pt
沙柳 Sp	332.88	360.00 × 404.38	37.00	杨柴 Hl、黑沙蒿 Ao

Sv: 沙地柏 *Sabina vulgaris*; Ao: 黑沙蒿 *Artemisia ordosica*; Sp: 沙柳 *Salix psammophila*; Ls: 赖草 *Leymus secalinus*; Cp: 假苇拂子茅 *Calamagrostis pseudophragmites*; Hl: 杨柴 *Hedysarum laeve*; Pt: 星星草 *Puccinellia tenuiflora*

在每个样方中采集一份灌木或伴生植物的叶片样品,用中号信封带回实验室,在65℃下干燥24 h,粉碎后过70目筛,然后在中国林业科学研究院的稳定同位素比率质谱实验室中测定δ<sup>13</sup>C值。叶片样品在Flash 2000元素分析仪中高温燃烧生成CO<sub>2</sub>,Finnigan MAT δV+质谱仪通过检测CO<sub>2</sub>中的<sup>13</sup>C与<sup>12</sup>C比率,并与国际标准物比对计算出样品的δ<sup>13</sup>C值。

在沙地柏和黑沙蒿群落中用EC-5土壤水分传感器监测10,20,30,50,100 cm和150 cm的土壤体积含水量,每5 min记录一个数据,连接CR300数据采集器存储数据。在沙柳群落中挖掘土壤剖面,用WET土壤水

分电导率温度速测仪测定不同深度的土壤体积含水量。

### 1.3 数据处理

水分的  $\delta^{18}\text{O}$  用平均值 $\pm$ 标准差 (mean $\pm$ SE) 表示。通过 Iso-Source 1.3.1 的多元线性混合模型, 计算 3 种灌木和伴生植物对不同深度土壤水的利用比例<sup>[19]</sup>, 结果用平均值 $\pm$ 标准误 (mean $\pm$ SD) 表示。模型中的混合物为灌木枝条水的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 水分来源为 6 层土壤水的  $\delta^{18}\text{O}$  值。潜在水分来源的增量设置为 1%, 容许插值设定为 0.1%。通过 SPSS 19.0 的双因素方差分析法 (Two-way ANOVA) 分析采样时间和物种对叶片稳定碳同位素值的影响是否显著。如果显著 ( $P < 0.05$ ), 再用 Duncan 多重比较分析不同时间或不同物种的叶片稳定碳同位素值之间的差异性。

## 2 结果

### 2.1 生长季鄂尔多斯生态站的降雨量

2018 年 4 月—9 月, 鄂尔多斯站的总降雨量是 367.0 mm。较大的日降雨量分别是 8 月 30 日的 34.4 mm、7 月 19 日的 32.2 mm 和 7 月 16 日的 31.8 mm。生长季的月降雨量分别是 25.6、47.6、11.4、144.2、92.2 mm 和 46.0 mm (图 2)。

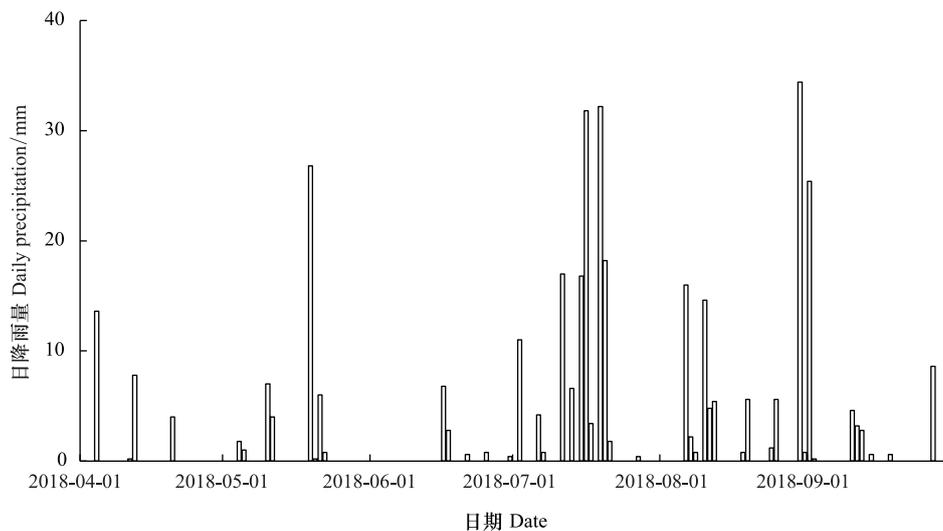


图 2 2018 年 4 月—9 月鄂尔多斯站的日降雨量

Fig.2 Daily precipitation on Ordos Station from April to September in 2018

### 2.2 生长季 3 种灌木群落的土壤含水量

沙地柏群落中 5 月 13 日 20 cm 土壤含水量最高, 达到 9.67%; 30 cm 土壤含水量次之, 为 6.03%。7 月 13 日 20 cm 土壤含水量最高, 达到 9.53%; 50 cm 土壤含水量次之, 为 8.55%。9 月 22 日 150 cm 土壤含水量最高, 达到 5.27%; 100 cm 土壤含水量次之, 为 4.60% (图 3)。

黑沙蒿群落中 5 月 13 日 50 cm 土壤体积含水量最高, 达到 14.25%; 10 cm 土壤含水量其次, 为 12.03%; 30 cm 土壤含水量再次之, 为 11.38%。7 月 13 日 10 cm 土壤含水量最高, 达到 15.19%; 20—50 cm 土壤含水量次之, 分别为 10.82%、10.14% 和 11.35%。9 月 22 日 50 cm 土壤含水量最高, 达到 16.16%; 30 cm 和 100 cm 土壤含水量次之, 分别为 14.58% 和 14.67% (图 3)。

沙柳群落中 5 月 14 日 20 cm 土壤含水量最高, 达到 14.6%; 10 cm 和 30 cm 土壤含水量其次, 分别为 10.75% 和 10.55%。7 月 14 日 10 cm 土壤含水量最高, 达到 15.65%; 20 cm 土壤含水量次之, 为 12.3%。9 月 22 日 10 cm 土壤含水量最高, 达到 11.7%; 20 cm 土壤含水量其次, 为 8.9% (图 3)。

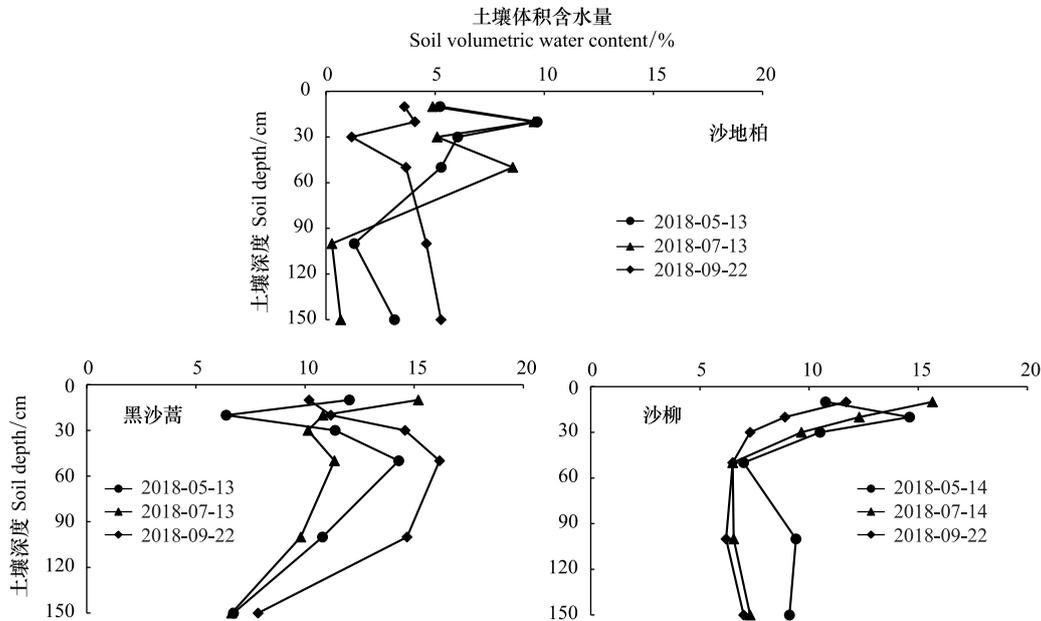


图3 2018年生长季3种灌木群落的土壤含水量

Fig.3 Soil water content in three shrub communities in the growing season of 2018

### 2.3 生长季3种优势灌木的水分来源

7月13日3种灌木群落中10 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值( $-15.14\text{‰}$ 、 $-14.02\text{‰}$ 、 $-11.53\text{‰}$ )都接近7月11日的雨水( $-18.53\text{‰}$ );9月22日10 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值( $-6.73\text{‰}$ 、 $-7.71\text{‰}$ 、 $-4.82\text{‰}$ )都接近9月11日的雨水( $-5.19\text{‰}$ )。沙地柏枝条木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值5月13日接近10—25 cm土壤水,7月13日 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近25 cm和100—200 cm土壤水,9月22日 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近25—200 cm土壤水(图4)。黑沙蒿群落中,黑沙蒿和杨柴的枝条木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值5月13日接近10—150 cm土壤水;7月13日 $\delta^{18}\text{O}$ 值都接近10 cm和150 cm土壤水;9月22日都接近10—150 cm土壤水(图4)。沙柳群落中,沙柳和杨柴的枝条木质部水分 $\delta^{18}\text{O}$ 值5月14日接近10 cm和50—200 cm土壤水,7月14日 $\delta^{18}\text{O}$ 值都接近10—25 cm和100—200 cm土壤水,9月22日 $\delta^{18}\text{O}$ 值都接近25—200 cm土壤水(图4)。

### 2.4 不同深度土壤水对3种灌木及伴生植物水分来源的贡献率

沙地柏5月13日主要利用25 cm土壤水,占其水分来源的78.5%;7月13日主要利用10 cm土壤水,占其水分来源的38.1%,其次是25 cm、100—200 cm土壤水,分别占其水分来源的11.0%—16.4%;9月22日主要利用10 cm土壤水,占其水分来源的36.8%,其次是25 cm、100—200 cm土壤水,分别占其水分来源的10.2%—15.4%(表2)。

表2 毛乌素沙地不同深度土壤水对沙地柏水分来源的贡献率(% ,平均值±标准误)

Table 2 Contribution of different depths soil water to water source of *Sabina vulgaris* in Mu Us Sandy Land (% , mean±SD)

土壤深度 Soil depth /cm	5月13日 May 13th	7月13日 July 13th	9月22日 September 22th
10	8.9±7.7	38.1±5.5	36.8±5.5
25	78.5±4.9	12.7±10.7	14.4±12.1
50	2.8±2.7	8.4±7.2	9.1±7.8
100	2.9±2.8	11.0±9.4	14.2±12.0
150	3.6±3.3	13.3±11.3	15.4±13.0
200	3.4±3.2	16.4±13.8	10.2±8.8

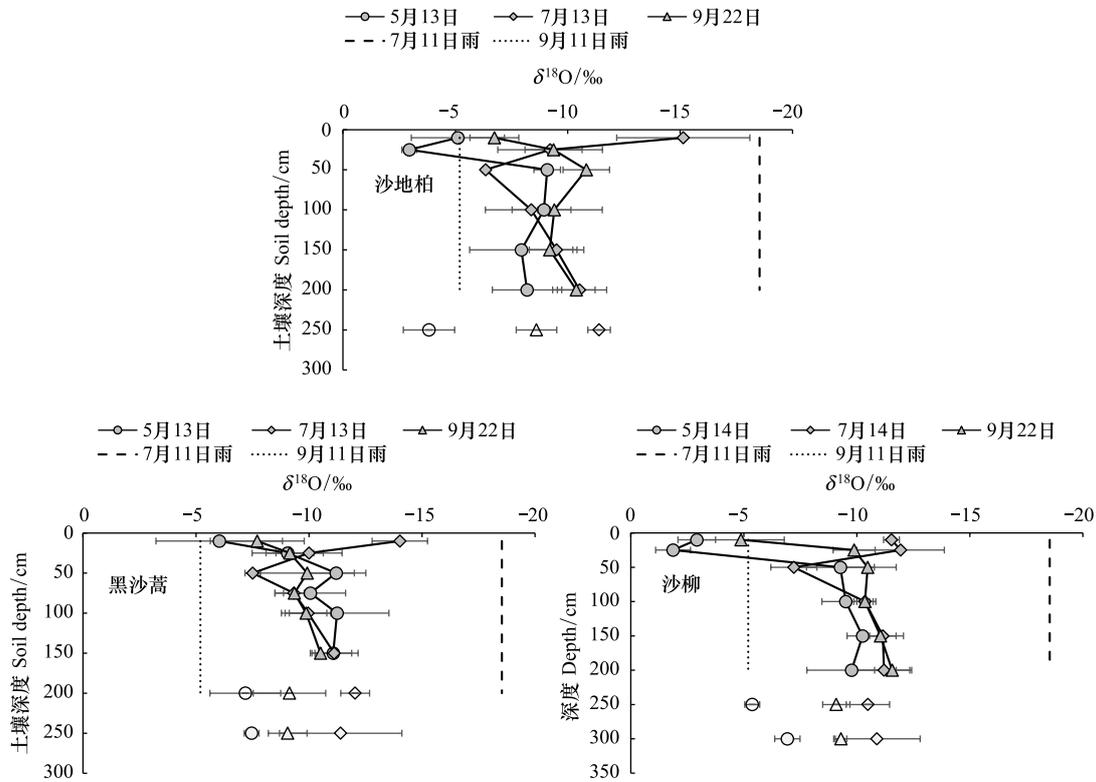


图 4 毛乌素沙地 3 种灌木群落的稳定氧同位素值

Fig.4 Stable oxygen isotope ratio of three shrub communities in Mu Us Sandy Land

深灰色图标是土壤水分,白色图标是灌木枝条水分,浅灰色图标为伴生植物杨柴的枝条水分

在黑沙蒿群落中,5月13日黑沙蒿和杨柴主要利用10 cm 土壤水,分别占其水分来源的72.9%和66.5%。7月13日黑沙蒿和杨柴主要利用10 cm 土壤水,分别占其水分来源的51.9%和36.6%;其次利用150 cm 土壤水,分别占其水分来源的13.9%和18.3%;9月22日黑沙蒿和杨柴主要利用10—25 cm 土壤水,分别占其水分来源的46.1%和49.0%;对其他各层土壤水的利用比例类似(表3)。

表 3 毛乌素沙地不同深度土壤水对黑沙蒿(Ao)和杨柴(Hl)水分来源的贡献率(% ,平均值±标准误)

Table 3 Contribution of different depths soil water to water source of *Artemisia ordosica* (Ao) and *Hedysarum laeve* (Hl) in Mu Us Sandy Land (% , mean±SD)

土壤深度 Soil depth/cm	5月13日 May 13		7月13日 July 13		9月22日 September 22	
	黑沙蒿 Ao	杨柴 Hl	黑沙蒿 Ao	杨柴 Hl	黑沙蒿 Ao	杨柴 Hl
10	72.9±3.1	66.5±3.6	51.9±5.5	36.6±7.0	26.0±7.9	30.0±7.5
25	7.9±6.9	9.7±8.4	9.9±8.5	13.1±11.1	20.1±16.8	19.0±16.0
50	4.4±4.0	5.5±4.9	5.9±5.3	7.9±6.8	12.9±11.0	12.2±10.4
75	5.8±5.1	7.2±6.3	8.4±7.3	11.2±9.5	17.6±14.8	16.7±14.0
100	4.4±4.0	5.5±4.9	9.8±8.4	13.0±11.0	13.3±11.2	12.5±10.7
150	4.5±4.1	5.7±5.0	13.9±11.8	18.3±15.4	10.1±8.7	9.6±8.2

在沙柳群落中,5月14日沙柳和杨柴主要利用10—25 cm 土壤水,分别占其水分来源的59.0%和37.9%;对其他各层土壤水的利用比例类似。7月14日沙柳主要利用50—200 cm 土壤水,占其水分来源的71.0%;杨柴主要利用10—25 cm 和100—200 cm 土壤水,占其水分来源的91.8%。9月22日沙柳和杨柴主要利用10—100 cm 土壤水,分别占其水分来源的73.8%和72.5%(表4)。

表 4 毛乌素沙地不同深度土壤水对沙柳(Sp)和杨柴(HI)水分来源的贡献率(% ,平均值±标准误)

Table 4 Contribution of different depths soil water to water source of *Salix psammophila* (Sp) and *Hedysarum laeve* (HI) in Mu Us Sandy Land (% , mean±SD)

土壤深度 Soil depth/cm	5月14日 May 14		7月14日 July 14		9月22日 September 22	
	沙柳 Sp	杨柴 HI	沙柳 Sp	杨柴 HI	沙柳 Sp	杨柴 HI
10	28.6±18.5	19.5±12.1	15.2±12.8	18.0±14.6	26.4±3.2	22.7±3.4
25	30.4±16.0	18.4±10.5	13.8±11.7	16.6±13.3	16.9±14.2	17.8±14.9
50	10.8±8.8	16.2±13.0	16.9±5.1	8.2±4.3	15.1±12.7	15.8±13.3
100	10.5±8.5	15.8±12.7	20.9±17.4	18.6±14.1	15.4±13.0	16.2±13.6
150	9.6±7.8	14.7±11.7	16.7±14.0	19.4±16.0	13.7±11.6	14.3±12.1
200	10.1±8.3	15.4±12.3	16.5±13.8	19.2±15.8	12.6±10.7	13.2±11.2

### 2.5 3种优势灌木和伴生植物叶片稳定碳同位素值的季节动态

物种 ( $P<0.001$ )、时间 ( $P<0.001$ ) 及其相互作用 ( $P=0.001$ ) 对叶片稳定碳同位素值的影响都达到显著水平 (表 5)。从季节动态来看,不同月份之间沙地柏的叶片稳定碳同位素值差异不显著 ( $P>0.05$ )。然而,不同月份之间黑沙蒿的叶片稳定碳同位素值的差异接近显著水平 ( $P=0.087$ );5 月的叶片稳定碳同位素值显著高于 9 月 ( $P<0.05$ )。不同月份之间沙柳的叶片稳定碳同位素值差异达到极显著水平 ( $P<0.001$ ),5 月和 7 月的叶片稳定碳同位素值显著高于 9 月 ( $P<0.05$ )。不同月份之间杨柴的叶片稳定碳同位素值差异也显著 ( $P<0.05$ ),5 月的叶片稳定碳同位素值显著高于 9 月 ( $P<0.05$ )。从种间差异来看,5 月 4 种植物的叶片稳定碳同位素值差异不显著 ( $P>0.05$ )。然而,7 月和 9 月 4 种植物的叶片稳定同位素值差异达到极显著水平 ( $P<0.001$ );沙地柏的叶片稳定碳同位素值显著高于其他 3 种植物 ( $P<0.05$ ) (图 5)。

表 5 物种和时间对叶片稳定碳同位素值影响的双因素方差分析

Table 5 Two-way ANOVA of the effect of species and time on leaf stable carbon isotope

变异来源 Source of variance	平方和 SS	均方 MS	F	P
物种 Species	30.582	10.194	34.582	<0.001
时间 Time	12.810	6.405	21.728	<0.001
相互作用 Interactions	10.367	1.728	5.861	0.001

SS:平方和 sum of squares;MS:均方 mean square

## 3 讨论

### 3.1 3种灌木群落水分来源的季节动态

毛乌素沙地的 4 种灌木和半灌木(沙地柏、黑沙蒿和沙柳及其伴生植物杨柴)采取资源依赖型水分利用策略,即生长季不同月份根据土壤水的可利用性,主要利用不同深度的土壤水。其中,沙地柏 5 月主要利用 25 cm 浅层土壤水,7 月和 9 月均主要利用 10—25 cm 浅层和 100—200 cm 深层土壤水。黑沙蒿及伴生植物杨柴一直利用相同的水分来源,即 5 月主要利用 10 cm 浅层土壤水,7 月同时利用 10 cm 浅层土壤水和 150 cm 深层土壤水,9 月则利用 10—150 cm 土壤水。沙柳 5 月主要利用 10—25 cm 浅层土壤水,伴生植物杨柴主要利用 50—200 cm 土壤水;7 月二者同时利用 10—25 cm 浅层土壤水和 100—200 cm 深层土壤水;9 月均主要利用 25—200 cm 土壤水。研究区的浅层地下水被采煤破坏后,深层地下水几乎不影响植被,因此降雨成为植物所利用的土壤水的补充来源。7 月和 9 月 3 种灌木群落内浅层土壤水的稳定氧同位素值均接近采样之前几天的雨水。本文的研究结果与前人的研究结果不同,这主要是生境的地下水状况差异造成的。例如,毛乌素沙地的乔木旱柳(*Salix matsudana*)和灌木沙地柏主要利用深层土壤水和地下水,而半灌木黑沙蒿主要利用浅层地下水。丘间地旱柳的地下水埋深是 1.0 m,沙丘上沙地柏生境的地下水埋深是 1.5 m,而黑沙蒿生境的地下水埋深是 1.3 m<sup>[6]</sup>。

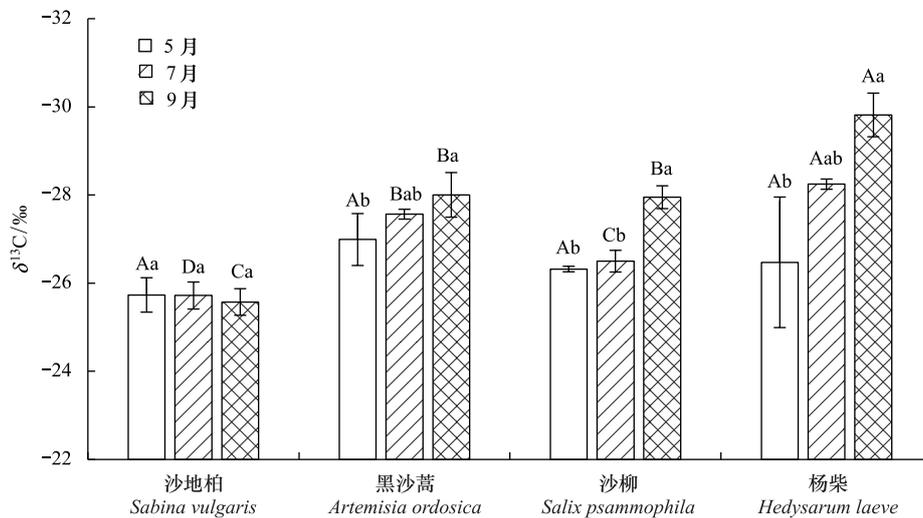


图5 毛乌素沙地4种植物的叶片稳定碳同位素值

Fig.5 Leaf stable carbon isotope of four species in Mu Us Sandy Land

伴生植物杨柴与群落优势种黑沙蒿或沙柳的水分来源范围一致,说明它与两种灌木均存在水分竞争。灌木在沙地生态系统中利用的水分来源与其根系类型密切相关,特别是细根分布。毛乌素沙地的杨柴根系深度超过 80 cm,生物量主要分布在 0—40 cm<sup>[20]</sup>。它的根系与黑沙蒿和沙柳的范围部分重叠。黑沙蒿的根系深度是 200 cm,细根主要分布在 0—40 cm<sup>[18]</sup>。沙柳的根系最深是 150 cm,细根主要分布在 0—50 cm<sup>[17]</sup>。这种情况在其他沙地植被中也存在。例如,科尔沁沙地的黄柳(*Salix gordejvii*)主要利用 0—50 cm 土壤水,而差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*)主要利用 10—150 cm 土壤水<sup>[10]</sup>。黄柳和差不嘎蒿混交群落内二者的根生物量均主要分布在 0—40 cm<sup>[21]</sup>。因此,退化沙地植被恢复过程中栽植灌木需要考虑深根系植物的合理配置,避免过度水分竞争。建议毛乌素沙地等半干旱区今后的生态建设中营造杨柴与黑沙蒿或沙柳等灌木混交林时保持合理的造林密度。

### 3.2 4种灌木叶片稳定碳同位素值的季节动态

毛乌素沙地的常绿灌木沙地柏的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值很稳定,而黑沙蒿、沙柳和杨柴3种落叶植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显的季节动态,即5月高于9月。5月采样之前降雨量低,气候干旱,黑沙蒿和沙柳群落的土壤表层含水量也较低。因此,这3种植物通过提高叶片稳定碳同位素值适应干旱。此外,从种间差异来看,5月4种植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值类似;然而,7月和9月沙地柏的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于其他3种植物,表现出竞争优势。常绿植物的这种优势在其他生态系统中也存在。例如,秋季乌兰布和沙漠沙冬青的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于黑沙蒿、白刺(*Nitraria tangutorum*)和柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)<sup>[22]</sup>。在黑河流域的上游山区,沙地柏的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高,达到 $-23.88\%$ ;青海云杉(*Picea crassifolia*)( $-24.94\%$ )和祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)( $-25.40\%$ )次之。这3种常绿植物均高于其他植物<sup>[23]</sup>。

## 4 结论

在毛乌素沙地,降雨补充的土壤水是沙地柏、黑沙蒿和沙柳3种灌木群落利用的主要水分来源。3种灌木及其伴生植物杨柴均采取资源依赖型水分利用策略,即根据不同深度土壤水的可利用性,在不同季节利用不同深度的土壤水。杨柴与黑沙蒿或沙柳伴生时均存在水分竞争。常绿灌木沙地柏的叶片稳定碳同位素值较高,可能具有竞争优势。干旱时3种落叶灌木黑沙蒿、沙柳和杨柴通过提高来叶片稳定碳同位素值适应环境。建议毛乌素沙地等半干旱区今后的生态林业工程注意灌木的合理配置和造林密度,避免水分竞争导致的人工植被衰退。

致谢:感谢内蒙古鄂尔多斯草地生态系统国家野外科学观测研究站提供降雨和黑沙蒿群落土壤水分数据。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1-16.
- [ 2 ] Cheng X L, An S Q, Li B, Chen J Q, Lin G H, Liu Y H, Luo Y Q, Liu S R. Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in northwestern China. *Plant Ecology*, 2006, 184(1): 1-12.
- [ 3 ] Yang H, Auerswald K, Bai Y F, Han X G. Complementarity in water sources among dominant species in typical steppe ecosystems of Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*, 2011, 340(1/2): 303-313.
- [ 4 ] Ohte N, Koba K, Yoshikawa K, Sugimoto A, Matsuo N, Kabeya N, Wang L H. Water utilization of natural and planted trees in the semiarid desert of Inner Mongolia, China. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 337-351.
- [ 5 ] Wei Y F, Fang J, Liu S, Zhao X Y, Li S G. Stable isotopic observation of water use sources of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Horqin Sandy Land, China. *Trees*, 2013, 27(5): 1249-1260.
- [ 6 ] Su H, Li Y G, Liu W, Xu H, Sun O J. Changes in water use with growth in *Ulmus pumila* in semiarid sandy land of northern China. *Trees*, 2014, 28(1): 41-52.
- [ 7 ] 菅晶, 贾德彬, 郭少峰, 钱龙娇. 2014 年浑善达克沙地黄柳生长季水分来源同位素示踪研究. 干旱区研究, 2017, 34(2): 350-355.
- [ 8 ] Zhu Y J, Wang G J, Li R Q. Seasonal dynamics of water use strategy of two *Salix* shrubs in alpine sandy land, Tibetan Plateau. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0156586.
- [ 9 ] 朱雅娟, 齐凯, 庞志勇. 夏季高寒沙地乌柳林的水分来源. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(1): 91-97.
- [ 10 ] 刘保清, 刘志民, 钱建强, 阿拉木萨, 张凤丽, 彭新华. 科尔沁沙地南缘主要固沙植物旱季水分来源. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2093-2101.
- [ 11 ] Song L N, Zhu J J, Li M C, Yu Z Y. Water utilization of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in a sparse wood grassland in the semiarid sandy region of Northeast China. *Trees*, 2014, 28(4): 971-982.
- [ 12 ] 林光辉. 稳定同位素生态学. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [ 13 ] 王静璞, 刘连友, 贾凯, 田丽慧. 毛乌素沙地植物物候时空变化特征及其影响因素. 中国沙漠, 2015, 35(3): 624-631.
- [ 14 ] 段义忠, 李娟, 杜忠毓, 亢福仁. 毛乌素沙地天然植物多样性组成及区系特征分析. 西北植物学报, 2018, 38(4): 770-779.
- [ 15 ] Ye X H, Liu Z L, Zhang S D, Gao S Q, Liu G F, Cui Q G, Du J, Huang Z Y, Cornelissen J H C. Experimental sand burial and precipitation enhancement alter plant and soil carbon allocation in a semi-arid steppe in north China. *Science of the total Environment*, 2019, 651: 3099-3106.
- [ 16 ] 何维明. 不同生境中沙地柏根面积分布特征. 林业科学, 2000, 36(5): 17-21.
- [ 17 ] 刘健, 贺晓, 包海龙, 周成军. 毛乌素沙地沙柳细根分布规律及与土壤水分分布的关系. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1362-1366.
- [ 18 ] 张军红, 韩海燕, 雷雅凯, 杨文斌, 李永华, 杨德福, 赵雪彬. 不同固定程度沙地油蒿根系与土壤水分特征研究. 西南林业大学学报, 2012, 32(6): 1-5.
- [ 19 ] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [ 20 ] 张雷, 王晓江, 洪光宇, 武永智, 李卓凡, 海龙, 王平平, 高孝威, 杨劫. 毛乌素沙地不同飞播年限杨柴根系分布特征. 生态学杂志, 2017, 36(1): 29-34.
- [ 21 ] 黄刚, 赵学勇, 赵玉萍, 苏延桂. 科尔沁沙地两种典型灌木独生和混交根系分布规律. 中国沙漠, 2007, 27(2): 239-243.
- [ 22 ] 朱雅娟, 贾志清, 卢琦, 郝玉光, 张景波, 李磊, 綦艳林. 乌兰布和沙漠 5 种灌木的水分利用策略. 林业科学, 2010, 46(4): 15-21.
- [ 23 ] 苏培玺, 严巧娣. 内陆黑河流域植物稳定碳同位素变化及其指示意义. 生态学报, 2008, 28(4): 1616-1624.