

青海共和盆地不同林龄乌柳林的水分利用策略

刘丽颖¹, 贾志清^{1*}, 朱雅娟¹, 李虹², 杨德福³, 魏登贤³, 赵雪彬³

(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; 3. 青海省治沙试验站,青海省共和县沙珠玉乡,青海 共和 813005)

摘要:利用稳定同位素技术,测定共和盆地不同林龄(5、9、25 a)乌柳枝条木质部和土壤各层水分的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值,分析它们是否随林龄变化而选择性地利用不同深度的土壤水分,并通过测定不同林龄乌柳叶片的 $\delta^{13}C$ 值,分析比较它们的长期水分利用效率。结果表明:5 a 乌柳主要利用源自降雨的 10~50 cm 深处的浅层土壤水分,9 a 乌柳主要利用降雨补充的 20 cm 和地下水补充的 30~50、150 cm 深处的土壤水分,25 a 乌柳主要利用降雨补充的 10~20 cm 和地下水补充的 50 cm 深处的土壤水分。3 个林龄乌柳的水分利用效率差异显著,5 a 乌柳的水分利用效率明显高于 9 a 和 25 a 乌柳,9 a 和 25 a 乌柳水分利用效率类似。水分利用策略的分析结果表明:9~25 a 乌柳处于稳定时期。

关键词:水分来源;水分利用效率;稳定氢同位素比率;稳定氧同位素比率;稳定碳同位素比率

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

Water Use Strategy of *Salix cheilophila* Stands with Different Ages in Gonghe Basin, Qinghai Province

LIU Li-ying¹, JIA Zhi-qing¹, ZHU Ya-juan¹, LI Hong², YANG De-fu³, WEI Deng-xian³, ZHAO Xue-bin³

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

2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Sand Control Experimental Station of Qinghai Province, Gonghe 813005, Qinghai, China)

Abstract: *Salix cheilophila* is one of the main shrub species for afforestation in Alpine Sandland of Gonghe Basin, Qinghai Province. Stable isotope technique was used to test the δD and $\delta^{18}O$ value of rain, well water, branch xylem and different soil depth of 5-, 9- and 25-year-old *S. cheilophila* plantation, and then the differences of main water source among the three *S. cheilophila* stands with different ages were analyzed. Also, the $\delta^{13}C$ value of leaves was tested to evaluate the water use efficiency (*WUE*) of the *S. cheilophila* stands. Comparison of δD and $\delta^{18}O$ showed that 5-year-old *S. cheilophila* used the water in 10–50 cm soil infiltrated from rainwater; 9-year-old *S. cheilophila* consumed relatively deep soil water, including 20 cm infiltrated from rainwater and 30–50, 150 cm replenished by ground water; and 25-year-old *S. cheilophila* used 10–20 cm soil water infiltrated from rainwater and 50 cm soil water replenished by ground water. The difference of leaf $\delta^{13}C$ value among 5-, 9- and 25-year-old *S. cheilophila* stands was significant; 5-year-old *S. cheilophila* has exclusively high *WUE*, whereas that of 9-year-old and 25-year-old stands were similar. The water source and *WUE* suggest that 9–25 years old *S. cheilophila* was in steady period.

Key words: water source; water use efficiency; δD ; $\delta^{18}O$; $\delta^{13}C$

收稿日期:2011-04-02

基金项目:林业公益性行业科研专项经费项目“高寒沙地防护林生态服务功能研究”(201204203);中国林业科学研究院林业研究所重点项目“优良沙生植物抗逆性及其栽培技术试验研究”(ZD200908);科技部农业科技成果转化项目(2011GB24320002)

作者简介:刘丽颖(1982—),女,吉林松原人,博士,主要从事退化土地植被恢复与重建研究。

* 通讯作者: Email: jiazq@caf.ac.cn

共和盆地位于青藏高原东北部,属于高寒干旱荒漠和半干旱草原过渡区域。共和盆地的土地沙漠化面积达 $126.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占盆地总面积的 92%, 严重沙漠化面积每年仍以 $0.12 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的速度扩展^[1]。流沙掩埋草场、农舍, 阻断公路交通, 严重影响当地人民的生产和生活; 因此, 逆转草地沙化进程, 恢复沙地植被, 已成为该地区生态环境建设的重点。近年来, 国内许多学者通过研究当地天然及人工林地内植物的生态功能性状, 探索当地相关植物对高寒干旱环境的适应机制和对环境的改良作用^[2-4]; 然而, 还不了解当地植物主要利用的水分来源和水分利用效率, 无法判断当地的水资源条件是否能够满足人工林生长的需要, 从而确定人工林能否在当地长期稳定地生长。

乌柳 (*Salix cheilophila* Schneid.) 是杨柳科 (Salicaceae) 柳属 (*Salix*) 植物, 为灌木或小乔木, 是当地人工灌木林的主要造林树种。乌柳为湿中生植物, 一般生长在地形部位较低, 地下水位较浅的丘间地或河流、溪沟两岸。乌柳耐寒, 较耐风蚀、沙埋和轻度盐碱化, 是良好的固沙树种^[5]。青海省治沙试验站自 1960 年起就在沙珠玉地区人工种植乌柳林, 采用纯林或乌柳-中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu)-沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.) 混交林方式, 已经取得了良好的生态恢复效果。国内许多学者针对乌柳育苗、造林技术^[6] 及一些生理特性, 如叶片解剖结构^[7]、蒸腾速率^[8]、水势及电导率^[9] 等进行了大量研究, 但是关于乌柳水分利用方面的报道很少。

本文利用稳定氢氧同位素技术分析比较人工乌柳林是否随林龄变化而选择性地利用不同深度的土壤水分, 利用稳定碳同位素技术比较它们的长期水分利用效率变化, 以了解乌柳对共和盆地高寒干旱

环境的适应机制, 为人工乌柳林的保育和防沙治沙实践中植物的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

研究地点是青海共和荒漠生态系统定位研究站, 位于青海共和盆地的沙珠玉地区, 地理坐标为 $99^{\circ}45' \sim 100^{\circ}30' \text{ E}$, $36^{\circ}03' \sim 36^{\circ}40' \text{ N}$, 海拔 $2\ 871 \sim 3\ 870 \text{ m}$ 。该区具有典型的高原大陆性气候特征, 年均气温 $2.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 月份平均气温 $-12.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 月份平均气温 $14.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量为 246.3 mm , 且季节分配不均, 干湿季非常明显, 大气降水主要集中在 5—9 月份, 年平均潜在蒸发量为 $1\ 716.7 \text{ mm}$ 。全年大风日数平均为 50.6 d , 最多可达 97 d , 风向主要为西、西北, 年平均风速 $2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大风速可达 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 无霜期平均为 91 d 。土壤主要有风沙土、盐土、草甸土和沼泽土等。当地的主要天然植物包括灌木油蒿 (*Artemisia ordosica* Krasch.) 和白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobr.), 以及草本植物赖草 (*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.) 等; 人工植物包括乔木青杨 (*Populus cathayana* Rehd.), 灌木乌柳、中间锦鸡儿和沙棘等。

1.2 研究对象

研究对象选自共和站试验园区内林龄为 5、9、25 a 的乌柳人工林。在 5 a 乌柳林内设置 $80 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ 样地, 在样地内设置 4 个样方, 样方面积 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 样方间隔 15 m 。在 9 a 乌柳林内设置 $100 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 样地, 在样地内设置 4 个样方, 样方面积 $10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 样方间隔 10 m 。在 25 a 乌柳林内设置 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 样地, 在样地内设置 4 个样方, 样方面积 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 样方间隔 10 m 。3 个林龄乌柳样地的位置、海拔、生境、土壤、平均株高、冠幅、造林方式和植被状况见表 1。

表 1 共和站试验园区内不同林龄的乌柳样地特征

项目	林龄/a		
	5	9	25
经度/纬度	$100^{\circ}13'24.23'' \text{ E}/36^{\circ}14'41.88'' \text{ N}$	$100^{\circ}13'56.40'' \text{ E}/36^{\circ}15'08.64'' \text{ N}$	$100^{\circ}13'56.85'' \text{ E}/36^{\circ}14'09.16'' \text{ N}$
海拔/m	2 878	2 886	2 888
生境	丘间地	丘间地	丘间地
土壤	细沙土(含黏土层)	细沙土(含黏土层)	细沙土(含黏土层)
平均株高/m	2.18	3.88	5.36
平均冠幅/(m × m)	1.67×1.70	1.86×1.75	2.52×2.68
造林方式	扦插造林, 6 行 1 带, 带间距 2.7 m,	扦插造林, 9 行 1 带, 带间距 15 m,	扦插造林, 9 行 1 带, 带间距 15 m,
	雨季抢播沙蒿、中间锦鸡儿	带间栽种沙棘、河坝柳	带间栽种沙棘、河坝柳
伴生种	苔草, 碱蓬	苔草, 赖草, 苦苦菜	棘豆, 委陵菜, 赖草
乌柳林总盖度/%	55	75	85
伴生植被盖度/%	7	30	85

1.3 采样和测量方法

2009年8月10-11日,分别在3个林龄的乌柳样地中采集植物和土壤样品,同时收集雨水和井水(代替地下水)。每种水样采集3瓶作为重复,采集到的水样立即用封口膜密封在8 mL的玻璃样品瓶中冷藏。

在不同林龄的乌柳样地的各个样方中分别选择4~5棵生长旺盛的植株,在每个植株阳面的中部采集1段4~5 cm长的枝条,除去树皮,保留木质部,立即用封口膜密封在8 mL的玻璃样品瓶中冷藏。3个林龄样地各采集4瓶作为重复。在5、9、25 a乌柳样地的样方中分别挖100、150、200 cm深的土壤剖面,土壤采样的深度分别为10、20、30、50、100、150、200 cm,每层4个重复。记录各层土壤质地(如细沙土或黏土),同时观察各林龄乌柳林细根根系的主要分布深度。各层的一部分土壤立即用封口膜密封在8 mL的玻璃样品瓶中冷藏。各层的另一部分土壤分别用铝盒带回,用电子天平(0.01 g)测量土壤湿质量,在105 °C的烘箱中干燥24 h后,测量土壤干质量,计算各层的土壤含水量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。土壤含水量的测试在共和站的实验室内完成。样品瓶中的土壤和枝条木质部冷藏带回中国林业科学研究院的稳定同位素比率质谱实验室,真空提取其中的水分,用质谱仪(Finnigan MAT Delta V advantage)测量雨水、井水、枝条木质部水分和土壤各层水分的稳定氢同位素比率(δD)和氧同位素比率($\delta^{18}\text{O}$):

$$\delta\text{D} = (R_{\text{sam}}/R_{\text{std}} - 1) \times 1000\text{‰},$$

$$\delta^{18}\text{O} = (R_{\text{sam}}/R_{\text{std}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中: R_{sam} 是样品的重氢同位素之比(D/H)和重氧同位素之比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), R_{std} 是标准物质(标准平均海水)的重氢同位素和重氧同位素之比^[10]。

检测方法:样品中含有的水分经真空系统提取后密封于2 mL玻璃瓶中,由AS3000自动进样器吸取0.1 μL 液体注入FLASH EA1112HT进行高温裂解生成CO与 H_2 ,由DELTA V检测稳定同位素比率值,每个样品连续检测3次,取第3次测定结果为实验结果。检测时的反应温度为1 380 °C,载气流速为80 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。标准样品连续测定精度: $\delta\text{D} < 1.5\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} < 0.2\text{‰}$ 。

在不同林龄的乌柳样地的样方中分别选择4~5棵生长旺盛的植株,在每株阳面的中部采集20~30片完全展开的健康叶片,混合作为1份样品,每个样地采集4份样品作为重复。各样方叶片分别用

纸袋带回实验室,在105 °C下杀青1 h,在80 °C下烘24 h,然后粉碎叶片,过80目筛,用质谱仪测定稳定碳同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)。

$$\delta^{13}\text{C} = (R_p/R_s - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中: R_p 是样品中碳元素的重轻同位素丰度之比($^{13}\text{C}_p/^{12}\text{C}_p$); R_s 是国际通用标准物质(PDB,美国南卡罗来纳州的碳酸盐陨石)的重轻同位素丰度之比($^{13}\text{C}_s/^{12}\text{C}_s$)^[11]。

$\delta^{13}\text{C}$ 值测定原理:样品在Flash1112 HT中高温氧化还原为 CO_2 ,质谱仪通过检测 CO_2 中的C得到样品中的 $\delta^{13}\text{C}$ 的比率值。样品检测方法是用锡杯在百万分之一的天平称量后包好,进入元素分析仪FLASH EA1112HT检测。主要试剂包括:三氧化二铬(Cr_2O_3),还原铜(Cu)和镀银氧化钴(CoO/Ag)。反应温度为950 °C,反应过程中载气流速为85 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。标样的连续测定精度为: $\delta^{13}\text{C} < 0.2\text{‰}$ 。

1.4 数据统计和分析

土壤含水量、各层土壤和植物枝条木质部水分、雨水以及井水的 δD 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值以及叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均用平均值 \pm 标准差表示。利用SPSS 16.0,通过单因素方差分析法分析3个林龄乌柳林各层土壤含水量的差异,各林龄乌柳木质部和土壤水分的 δD 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的差异以及不同林龄乌柳叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异是否显著($P < 0.05$),如果显著,再通过Tukey's检验确定各层之间的土壤含水量、乌柳木质部与土壤水分的 δD 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值或者不同林龄之间的差异性。

2 结果与分析

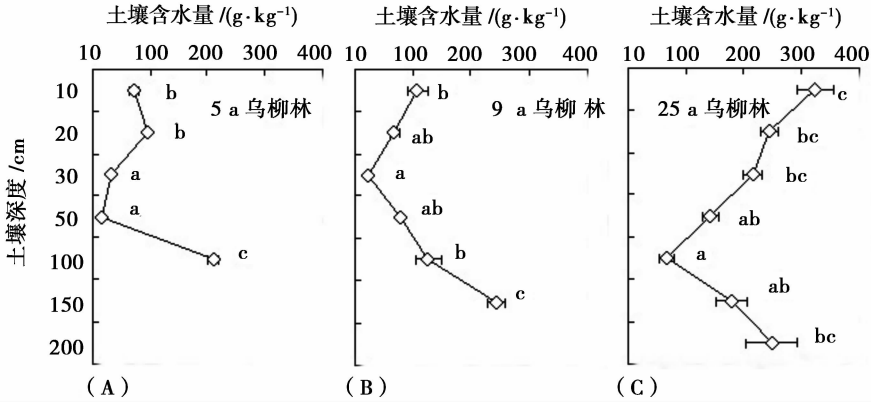
2.1 不同林龄乌柳林中土壤含水量的变化

通过挖取土壤剖面时的观察,5 a乌柳林, ≥ 100 cm深处的土壤为黏土,其余各土层为细沙土;9 a乌柳林,100~150 cm深处的土壤为黏土,其余各土层为细沙土;25 a乌柳林,20~100 cm深处的土壤为细沙土与少量黏土的混合土,其余各层土壤均为黏土。

5 a乌柳林的各层土壤含水量差异显著($P < 0.05$),其中100 cm深处的土壤含水量最高,达210.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他土层($P < 0.05$);50 cm深处的土壤含水量最低,只有15.7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图1A)。9 a乌柳林30 cm深处的土壤含水量最低,为23.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;30~150 cm深处的土壤含水量随着深度的增加而增大,150 cm深处的土壤含水量最

高,达到 $243.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,显著高于其他土层 ($P < 0.05$) (图 1B)。25 a 乌柳林的表层 (10 cm) 含水量最高,为 $324.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右;随后土壤含水量逐渐降低,直至 100 cm 深处降为最低,为 $67.2 \text{ g} \cdot$

kg^{-1} 左右;100 ~ 200 cm 深处的土壤含水量逐渐增大,200 cm 深处的土壤含水量为 $249.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右 (图 1C)。



图中以不同小写字母标记表示不同深度的土壤含水量差异显著 ($P < 0.05$)

图1 不同林龄乌柳林的土壤含水量

2.2 不同林龄乌柳的土壤和枝条水分的 δD 值的变化

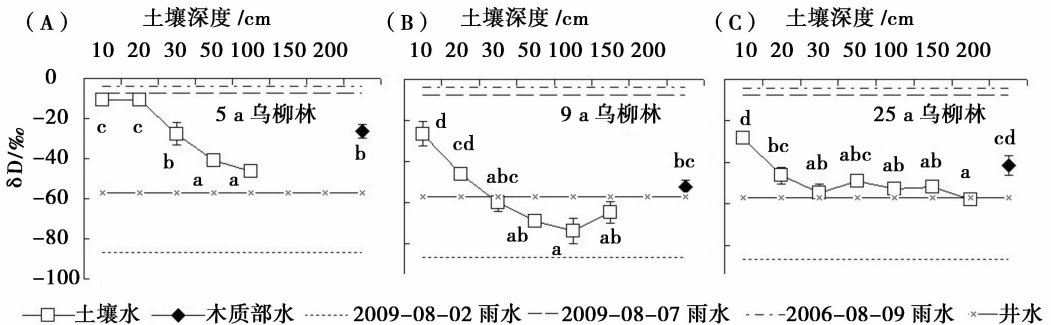
2009年8月初共和站共记录到3次降雨,分别是8月2日(8.3 mm),8月7日(8.5 mm)和8月9日(3.5 mm),雨水的 δD 值分别为 (-86.66 ± 0.09)‰, (-7.47 ± 0.39)‰和 (-4.04 ± 0.24)‰。乌柳生境附近井水的 δD 值为 (-57.13 ± 0.85)‰,井水水面深2~3 m。

5 a 乌柳枝条木质部水分的 δD 值与其生境中 30 cm 深处的土壤水分的 δD 值最接近 ($P > 0.05$) (图 2A)。5 a 乌柳生境中 10 ~ 20 cm 深处的土壤水分的 δD 值与 2009 年 8 月 7 日 8.5 mm 降的雨水的 δD 值接近 (图 2A),表明表层土壤水分主要来源

于降雨。5 a 乌柳生境中 100 cm 深处的土壤水分的 δD 值接近井水的 δD 值 (图 2A),表明地下水毛管上升补充了土壤水分。

9 a 乌柳枝条木质部水分的 δD 值与其生境中 20 ~ 50、150 cm 深处的土壤水分的 δD 值接近 ($P > 0.05$)。9 a 乌柳生境中 30 ~ 50、150 cm 深处的土壤水分的 δD 值与井水的 δD 值接近,各层土壤水分的 δD 值与 3 次降水的 δD 值均相差较远 (图 2B)。

25 a 乌柳枝条木质部水分的 δD 值与其生境中 10 ~ 20、50 cm 深处的土壤水分的 δD 值接近 ($P > 0.05$)。25 a 乌柳生境中 30 ~ 200 cm 深处的土壤水分的 δD 值与井水的 δD 值接近,各层土壤水分的 δD 值与 3 次降水的 δD 值均相差较远 (图 2C)。



图中以不同小写字母标记表示乌柳木质部水分与各深度土壤水分的 δD 值差异显著 ($P < 0.05$)

图2 不同林龄乌柳的土壤和枝条水分的 δD 值

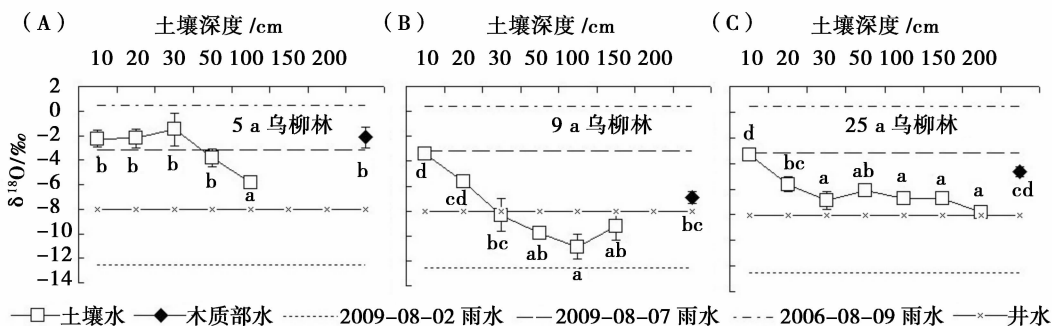
2.3 不同林龄乌柳的土壤和枝条水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化

采样之前,共和站记录的3次降雨的雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $(-12.57 \pm 0.05)\text{‰}$, $(-3.16 \pm 0.08)\text{‰}$ 和 $(0.43 \pm 0.06)\text{‰}$ 。乌柳生境附近井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $(-8.05 \pm 0.12)\text{‰}$ 。

5 a 乌柳枝条木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与其生境中 10~50 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近(图 3A) ($P > 0.05$)。5 a 乌柳生境中 10~20、50 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 2009 年 8 月 7 日 8.5 mm 降雨的雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近,100 cm 深处土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图 3A)。

9 a 乌柳枝条木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与其生境中 20~30、50、150 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近 ($P > 0.05$)。9 a 乌柳生境中 10~20 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 2009 年 8 月 7 日 8.5 mm 降雨的雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近,30~50、150 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近(图 3B)。

25 a 乌柳枝条木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与其生境中 10~20 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近($P > 0.05$)。25 a 乌柳生境中 10 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 2009 年 8 月 7 日 8.5 mm 降雨的雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近,30、100~200 cm 深处的土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近(图 3C)。

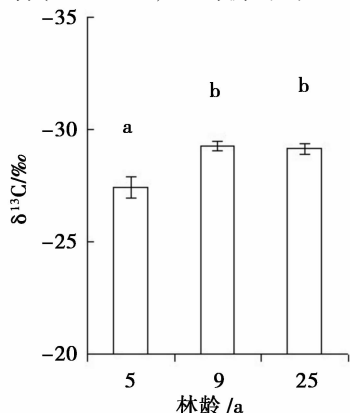


图中以不同小写字母标记表示乌柳木质部水分与各深度土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同林龄乌柳的土壤和枝条水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

2.4 不同林龄乌柳叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

叶片的稳定碳同位素的测量结果(图 4)表明:乌柳叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同林龄植株间存在显著差异 ($P < 0.05$)。5 a 乌柳叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著比 9 a 和 25 a 的高($P < 0.05$),但 9 a 乌柳叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 25 a 的差异不显著($P > 0.05$)。乌柳叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围



图中以不同小写字母标记表示不同林龄乌柳的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同林龄乌柳叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

在 C_3 植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围内 ($-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$),因此它是 C_3 植物,叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以反映它的长期水分利用效率^[11]。

3 结论

3.1 不同林龄的乌柳生境中土壤含水量的差异

乌柳的生境是丘间地,有较好的深层土壤水分条件,所以3个林龄的乌柳林中土壤含水量均较高。随着林龄的增长,浅层土壤(10 cm)水分含量有增加的趋势,这与降雨的补充及林地内的植被盖度影响有关。乌柳成林后,其群落保持着较高的盖度,3个林龄的盖度分别为55%、75%和85%。植被覆盖可以减少阳光直射地面、增加群落内湿度、降低温度等,从而降低地面蒸发和植物蒸腾。因此,随着林龄的增大,土壤含水量的最高值也随之增大;而且,土壤含水量峰值均出现在黏土层(100~200 cm),这与黏土的保水力高于沙土有关。

3.2 不同林龄乌柳的水分来源和水分利用效率的差异

5 a 乌柳主要利用 10 ~ 50 cm 的土壤水分,这部分土壤水分的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值与 8 月 7 日 8.5 mm 降雨的雨水的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值接近,即这部分土壤水分主要由降雨转化而来,表明 5 a 乌柳主要利用土壤浅表层的天然降雨。植物根系分布特点决定植物的水分利用策略。在降水驱动的干旱区生态系统中,浅根系的植物以不定的降水为主要水分来源^[12]。根据挖取土壤剖面时的观察,5 a 乌柳林根系尤其是吸水根系($d \leq 1$ mm)主要分布在 10 ~ 50 cm 深处的土层,进一步验证了 5 a 乌柳林主要利用天然降水。同时,由于 5 a 乌柳木质部水分的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值与井水的值均差异较大,表明 5 a 乌柳林没有利用地下水,这就可能致使 5 a 乌柳在缺水季节受到一定的水分胁迫,导致其 $\delta^{13}C$ 值(-27.42 ± 0.99)‰)明显高于 9 a 和 25 a 乌柳。因此,5 a 乌柳在尚未能够利用地下水之前,采取提高其水分利用效率的方法来应对干旱胁迫。

9 a 乌柳主要利用 20 ~ 50、150 cm 深处的土壤水分。10 ~ 20 cm 深处的土壤水分的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值与 8 月 7 日 8.5 mm 降雨的雨水的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值接近,30 ~ 50、150 cm 深处的土壤水分的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值、井水的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值接近,表明 9 a 乌柳在利用降雨的同时,还可以利用地下水。根据观察,9 a 乌柳林的吸水根系($d \leq 1$ mm)主要分布在 10 ~ 100 cm 深处的土层,但在 120 cm 深处发现 $d > 10$ mm 的粗根。有关研究表明,随着地上生物量的增加,植株地下生物量随之增加^[13]。本研究中,相对于 5 a 乌柳林(平均株高 2.18 m),9 a 乌柳林(平均株高 3.88 m)的根系生物量可能更大,并且在土壤中分布更深。根系可以通过水力提升作用将深层土壤水分释放到浅层干旱土壤中^[14]。乌柳根系的水力提升作用可能是 9 a 乌柳林 30 ~ 50 cm 深处的土壤水分的 δD 值、 $\delta^{18}O$ 值均分别与井水的 δD 值与 $\delta^{18}O$ 值接近的一个原因。该现象还需要进一步研究才能确认。因为可以同时利用降雨和地下水,9 a 乌柳林比 5 a 乌柳林受到相对较小的水分胁迫,这从其 $\delta^{13}C$ 值(-29.24 ± 0.52)‰)较低也可以表现出来。

25 a 乌柳主要利用 10 ~ 20、50 cm 深处的土壤水分,10 cm 深处的土壤水分的 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值与 8 月 7 日 8.5 mm 降雨的雨水的 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值接近,30 ~ 200 cm 深处的土壤水分的 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值分

别与井水的 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值接近,表明 25 a 乌柳同样主要利用降雨和地下水。观察发现:25 a 乌柳的吸水根($d \leq 1$ mm)主要分布在 10 ~ 100 cm 深处的土层,这部分土壤为细沙土与少量黏土的混合。在一定范围内土壤越疏松,土壤密度越小,就越有利于细根的发育^[15]。这就可能解释了 25 a 乌柳林细根并没有随着林龄的增大与地上生物量的增加而继续向更深土层发育。25 a 乌柳叶片 $\delta^{13}C$ 值(-29.32 ± 0.33)‰)与 9 a 乌柳叶片 $\delta^{13}C$ 值类似,表明 25 a 乌柳林也相对没有受到水分胁迫。

4 讨论

本研究在同一气候条件下进行,因此各林龄乌柳林的水分利用策略差异取决于林龄变化引起的对环境因子的适应能力。乌柳在不同林龄的发展阶段有着不同的生存策略。5 a 乌柳只能利用降雨而没有利用地下水,采取提高水分利用效率来适应当地的半干旱环境;而 9 a 和 25 a 乌柳能够同时利用降雨和地下水,受到相对较小的水分胁迫,水分利用效率相对较低。虽然由于林下土壤质地的不同,致使 25 a 乌柳林的细根并没有继续向更深土层发育,但 25、9 a 乌柳叶片 $\delta^{13}C$ 值类似,表明 25 a 乌柳并没有发生显著退化,这就说明 9 ~ 25 a 阶段的乌柳林正处于稳定时期,能够同时利用降雨和地下水。在筛选适宜的固沙植物和设计种植密度时,植物水分利用策略应是重点考虑的问题。研究表明,大面积种植主要利用地下水的植物会导致其生境内地下水发生不可逆转的亏缺^[16];但是,在已经形成良性循环的生态系统中,植物对水分的吸收不会造成对土壤水分的过度利用以及生态系统的退化和环境恶化^[17]。因此,乌柳是否可以作为共和盆地沙化土地治理的主要灌木进行大面积栽植,还需要对其耗水特性进行深入研究,包括分析乌柳的根系分布及其他水分生理生态特性(如枝条水势和液流等)。

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
- [2] 杨洪晓,卢 琦,吴 波,等. 高寒沙区植被人工修复与种子植物物种多样性的变化[J]. 林业科学, 2004, 40 (5): 45 - 49
- [3] 齐雁冰,常庆瑞. 高寒地区人工植被恢复对风沙土区土壤效应影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19 (6): 40 - 43
- [4] 李永华,罗天祥,卢 琦,等. 青海省沙珠玉治沙站 17 种主要植物叶性因子的比较[J]. 生态学报, 2005, 25 (5): 994 - 999
- [5] 李耀阶. 青海木本植物志[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1987:

128 - 129

- [6] 王生录,杨红文. 共和盆地高寒沙区乌柳造林技术研究[J]. 青海农林科技, 2002 (2): 10 - 11
- [7] 董建芳,李春红,刘果厚,等. 内蒙古6种沙生柳树叶片解剖结构的抗旱性分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29 (3): 480 - 484
- [8] 宋云民,包哈申. 毛乌素沙地沙柳、乌柳及旱柳蒸腾耗水变化规律的研究[J]. 林业实用技术, 2006 (5): 8 - 10
- [9] 哈申格日乐,宋云民,李吉跃,等. 水分胁迫对毛乌素地区4树种幼苗生理特性的影响[J]. 林业科学研究, 2006, 19 (3): 358 - 363
- [10] 曹燕丽,卢琦,林光辉. 氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景[J]. 生态学报, 2002, 22 (1): 111 - 117
- [11] 陈世苹,白永飞,韩兴国. 稳定性碳同位素技术在生态学研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2002, 26 (5): 549 - 560
- [12] Schwinning S, Ehleringer J. Water use trade-off and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystem [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89: 464 - 480
- [13] 杨劼,高清竹,李国强,等. 皇甫川流域主要人工灌木水分生态的研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17 (1): 87 - 94
- [14] 阿拉木萨,蒋德明,骆永明. 植物根系水力提升作用研究进展综述[J]. 干旱区研究, 2008, 25 (2): 236 - 241
- [15] 任安芝,高玉葆,王金龙. 不同沙地生境下黄柳 (*Salix gordejewii*) 的根系分布和冠层结构特征[J]. 生态学报, 2001, 21 (3): 399 - 404
- [16] Ohte N, Koba K, Yoshikawa K, *et al.* Water utilization of natural and planted trees in the semiarid desert of Inner Mongolia, China [J]. *Ecological Applications*, 2003, 13 (2): 337 - 351
- [17] 李鹏,赵忠,李占斌,等. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展[J]. 西北林学院学报, 2002, 17 (2): 26 - 32