

# 辽西半干旱区不同林龄大扁杏人工林的水分利用特征

刘丽颖<sup>1,2</sup>, 殷有<sup>1,2</sup>, 秦胜金<sup>1,2</sup>, 周永斌<sup>1,2</sup>, 卢国珍<sup>3</sup>, 耿占礼<sup>3</sup>

(1. 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866; 2. 中国森林生态系统监测网络/辽宁辽河平原森林生态系统定位研究站, 沈阳 110866; 3. 辽宁省干旱地区造林研究所, 辽宁 朝阳 122000)

**摘要:** 利用稳定氧同位素技术, 测定辽西地区不同林龄(5, 11, 17 a)大扁杏枝条木质部水分、土壤水、降雨的雨水和井水的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 结合其根系分布特征, 分析不同林龄大扁杏人工林主要利用的水分来源; 测定叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值, 分析不同林龄大扁杏人工林的水分利用效率。结果表明, 大扁杏人工林利用土壤水的深度不同, 5 年和 11 年生大扁杏人工林主要利用 0—30 cm 深度的土壤水, 与其吸水根( $d \leq 1$  mm)分布的土层深度一致, 二者输导根分布在 20—50 cm 土层深度; 17 年生大扁杏人工林主要利用 0—20 cm 和 50—70 cm 深度的土壤水, 其吸收根分布在 0—30 cm 土层深度, 输导根分布在 10—70 cm 土层深度;  $\delta^{18}\text{O}$  值表明, 3 个林龄大扁杏人工林利用的土壤水均来自降雨的雨水和地下水; 5 年生大扁杏林的水分利用效率为  $-24.1\%$ , 显著高于 11 年生和 17 年生大扁杏林( $P < 0.05$ )。大扁杏人工林在不同生长发育阶段因其根系分布的差异而具有不同的水分利用特征, 有助于其更好地适应辽西地区的半干旱环境。

**关键词:** 大扁杏; 辽西半干旱区;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta^{13}\text{C}$ ; 林龄; 水分利用

中图分类号: S662.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0118-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.021

## Water Use Characteristics of Different Ages of *Prunus armeniaca* Plantations in Semi-arid Region of Western Liaoning Province

LIU Liying<sup>1,2</sup>, YIN You<sup>1,2</sup>, QIN Shengjin<sup>1,2</sup>, ZHOU Yongbin<sup>1,2</sup>, LU Guozhen<sup>3</sup>, GENG Zhanli<sup>3</sup>

(1. College of Forestry, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866;

2. Research Station of Liaohe-River Plain Forest Ecosystem CFERN, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866; 3. Liaoning Provincial Arid Area Afforestation Institute, Chaoyang, Liaoning 122000)

**Abstract:** *Prunus armeniaca* is a main shrub species of ecological and economic plantation in semi-arid area in western Liaoning Province. A water use strategy, including the main water source which a plant species utilizes and water use efficiency (WUE), plays an important role in plant survival and growth. Understanding the water use strategies of a shrub plantation can be used to evaluate the sustainability and long-term stability of the plantation. Stable oxygen isotope ratios ( $\delta^{18}\text{O}$ ) of water in rain, well, branch xylem, and in soil at different depth of 5, 11 and 17-year-old *P. armeniaca* plantation were tested to trace the main water source of *P. armeniaca*. Root systems were investigated to determine the depth of the main distribution. Leaf carbon isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ) were used to evaluate the long-term WUE of *P. armeniaca* plantation. The results showed that 5 and 11-year-old *P. armeniaca* plantations mainly derived soil water from the 0—30 cm layer, which were coincident with the distribution of their fine roots. Conductive root systems of 5 and 11-year-old *P. armeniaca* plantations were distributed primarily in the 20—50 cm layer. 17-year-old *P. armeniaca* plantations derived water mainly from the 0—20 cm and 50—70 cm layers, with their fine root and conductive root system being distributed primarily in the 0—30 cm and 10—70 cm layer, respectively. The  $\delta^{18}\text{O}$  values indicated that these sources of soil water were recharged by rainfall and groundwater. The long-term WUE of 5-year-old plantation ( $-24.1\%$ ) was greater than those of the 11 and 17-year-old plantations ( $P < 0.05$ ). The water use strategies suggested that *P. armeniaca* plantation can adapt to a semi-arid environment of western Liaoning Province by changing its water use strategy over time.

**Keywords:** *Prunus armeniaca*; semiarid region of Western Liaoning Province;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta^{13}\text{C}$ ; plantation age; water use

收稿日期: 2016-05-30

资助项目: 林业公益性行业科研专项(201304216, 201404303); 国家自然科学基金项目(31400611); 沈阳农业大学青年教师科研基金项目(20131017)

第一作者: 刘丽颖(1982—), 女, 博士, 讲师, 主要从事森林水分生理生态研究。E-mail: liuliyingssau@163.com

通信作者: 周永斌(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事森林生态研究。E-mail: yzyzb@163.com

水分是干旱地区生态系统中植物生存、生长和繁殖的关键<sup>[1]</sup>。研究植物的水分利用特征,主要包括植物利用的水分来源(地下水、降水和土壤水等)和水分利用效率,有助于分析植物对环境的适应策略,进而评价植物的适应性和稳定性。目前,稳定同位素技术被广泛应用于干旱和半干旱区植物的水分利用特征研究<sup>[2]</sup>。由于根系吸收水分以及水分在植物体内传输到达叶片之前一般不发生同位素分馏,因此,通过比较植物茎中木质部的水分与潜在水源的稳定氧同位素组成( $\delta^{18}\text{O}$ ),可以确定植物利用的主要水分来源<sup>[3]</sup>。植物水分利用效率是植物耗水和抗干旱胁迫能力的重要表征,与水源的可利用性呈负相关,与植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值呈正相关,因此, $\delta^{13}\text{C}$  值被作为衡量植物长期水分利用效率(WUE)的指标<sup>[4]</sup>。大量研究表明,植物的水分利用特征会随着生活型差异<sup>[5]</sup>和环境条件<sup>[6]</sup>的不同而发生改变,然而,有关植物生活史阶段是否影响植物水分利用特征的相关研究较少。

辽宁省西部属半干旱地区,气候生态条件恶劣,年平均降雨量不足 500 mm,且分布不均,而年均蒸发量为常年降雨量的 3~4 倍。尤其近年辽西地区地下水位不断下降,区域土壤水分亏缺严重,导致樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)<sup>[7]</sup>、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)等人工林出现大面积衰退甚至死亡现象<sup>[8]</sup>。因此,研究该区植物的水分利用特征十分必要。大扁杏(*Prunus armeniaca* L.)是蔷薇科杏属植物,是辽西地区大力推广的生态经济造林树种之一,种植面积达 6 000~7 000 hm<sup>2</sup>。目前有关大扁杏的研究主要集中在光合生理等方面<sup>[9]</sup>,对其水分利用特征的研究鲜有报道。本研究以不同林龄的大扁杏人工林为研究对象,应用稳定氧同位素技术及植物根系分布特征综合确定大扁杏的水分利用来源,分析大扁杏人工林在不同生长发育阶段是否选择性地利用不同深度的土壤水,以及可利用的土壤水分的补给来源;应用稳定碳同位素技术测定大扁杏人工林的水分利用效率。综合分析大扁杏人工林的水分利用特征,为评价大扁杏人工林在辽西地区的适应性和稳定性提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点

研究地点是辽宁省干旱地区造林研究所的西山试验区,位于辽宁省建平县富山镇,地理坐标为 E 119°15'—120°03', N 41°19'—42°24',海拔 400~550 m。该区属温带半干旱大陆性季风气候,年均气温 5.6 °C,极端最高温 36.7 °C,极端最低温 -30.5 °C,年平均降水量为 450 mm 左右,且季节分配不均,主要集中在 7—8 月。年平均潜在蒸发量为 1 700 mm,

相对湿度 51%,平均无霜期 141.8 d。土壤主要为褐土,pH 8.0~8.5。当地主要造林树种有乔木油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、樟子松和蒙古栎(*Quercus mongolica* Fischer ex Ledebour)等,灌木有大扁杏、沙棘和胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz)等。

### 1.2 研究对象

选自辽宁省干旱地区造林研究所西山试验区内林龄为 5,11,17 年生的大扁杏人工林。在各林龄大扁杏人工林内分别设置 50 m×50 m 样地,各样地内分别设置 3 个样方,样方面积 20 m×20 m,样方间隔 10 m。3 个林龄大扁杏人工林样地的具体特征见表 1。

表 1 不同林龄大扁杏人工林样地特征

特征	林龄/a		
	5	11	17
海拔/m	499	530	523
生境	丘间地	丘间地	丘间地
平均株高/m	3.97	4.64	5.03
平均冠幅/(m×m)	3.20×3.30	3.30×3.65	3.50×3.63
总盖度/%	65	70	75

### 1.3 样品采集

1.3.1 植物木质部样品 2013 年 8 月 1—3 日,在 5,11,17 年生大扁杏人工林样地中分别选择 4~5 棵生长旺盛的大扁杏植株,在每棵植株阳面中部采集 1 段 4~5 cm 长枝条,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。每样地采集 3 瓶作为重复。

1.3.2 土壤样品 在各样地的各个样方中分别挖 100 cm 深的土壤剖面,土壤采样的深度范围分别为 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm,每层 3 个重复。取样时间与枝条木质部取样保持同步。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,另一部分土壤用铝盒采集带回实验室,置于 105 °C 的烘箱中干燥 24 h 后至衡重,计算各层的土壤质量含水量(%)。

1.3.3 地下水和雨水样品 取研究点附近的深层井水代表地下水,将水装入 8 ml 玻璃样品瓶,立即用封口膜密封,冷藏。在研究样地附近的平坦地面放置 3 个雨量筒收集雨水。每次降雨过后立即采集雨水,装入 8 ml 玻璃样品瓶密封,冷藏。降雨量通过标准雨量计测定。井水和雨水样品均 3 个重复。

1.3.4 叶片样品 在各样地的各个样方中分别选取 4~5 棵生长旺盛的大扁杏植株,在植株阳面的中部采集 20~30 片完全展开的健康叶片,混合作为一份样品。每样地采集 3 份样品作为重复。样品放在透气性好的取样袋中,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,常温保存。

1.3.5 根系样品 采用土壤剖面法采集根系样品。

土壤剖面深度以根系明显稀疏为限。在每一剖面上以 10 cm 的间隔分层, 从外向内分割成 50 cm × 50 cm × 10 cm 土柱, 剪取土柱内所有根系, 带回实验室内冲洗、晾干。将根系按直径分为 ≤ 1 mm 和 > 1 mm 两个级别, 置 80 °C 烘箱中烘干至恒重, 测量根系生物量(g), 计算根密度(g/m<sup>3</sup>)。

#### 1.4 测定指标与方法

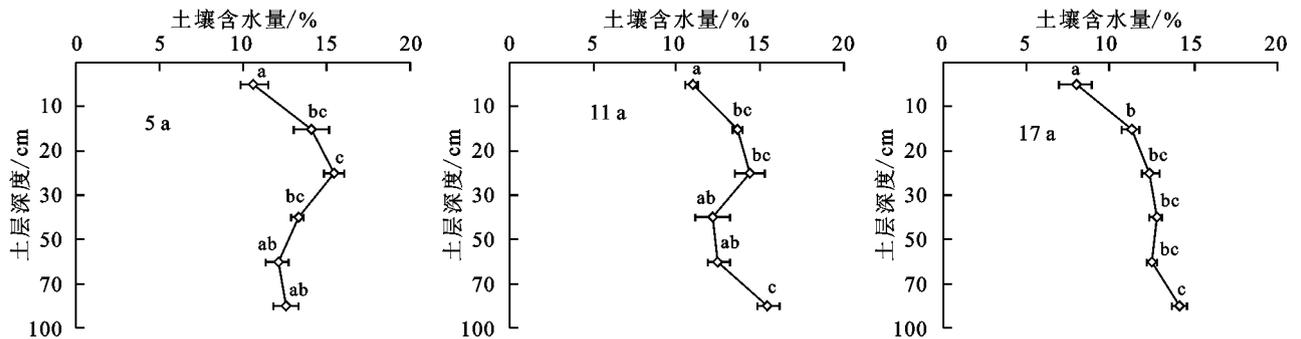
所有样品送交中国林科院的稳定同位素比率质谱实验室, 用质谱仪(Thermo Delta V advantage, USA)测量稳定氧同位素比率和稳定碳同位素比率。测量精度为 ± 0.2‰。枝条木质部水分和土壤水分采用低温真空蒸馏法提取<sup>[2]</sup>。稳定同位素比率公式表示为:

$$\delta^{18}\text{O}(\delta^{13}\text{C}, \text{‰}) = (R_{\text{sam}}/R_{\text{std}} - 1) \times 1000$$

式中:  $R_{\text{sam}}$  是样品中元素的重轻同位素之比( $^{18}\text{O}_{\text{sam}}/^{16}\text{O}_{\text{sam}}$  或  $^{13}\text{C}_{\text{sam}}/^{12}\text{C}_{\text{sam}}$ ),  $R_{\text{std}}$  是国际通用标准物质的重轻同位素之比( $^{18}\text{O}_{\text{std}}/^{16}\text{O}_{\text{std}}$  或  $^{13}\text{C}_{\text{std}}/^{12}\text{C}_{\text{std}}$ )<sup>[2]</sup>。

#### 1.5 数据统计与分析

所有数据均用平均值 ± 标准差(mean ± SE)表示。



注: 图中不同小写字母表示不同层次土壤含水量差异显著( $P < 0.05$ )。

图1 大扁杏林地土壤含水量

#### 2.2 大扁杏枝条木质部水分、土壤水分、雨水和井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

2013年8月1日采集植物和土壤样品前, 研究地发生3次降雨, 分别是7月15日, 降雨量8.5 mm; 7月26日, 降雨量4.1 mm; 7月31日, 降雨量3.2 mm。3次降雨的雨水  $\delta^{18}\text{O}$  值分别为  $(-10.28 \pm 0.04)\text{‰}$ ,  $(-6.56 \pm 0.06)\text{‰}$  和  $(-5.73 \pm 0.05)\text{‰}$ 。大扁杏林地附近井水

利用 Iso-source 1.3.1 分析大扁杏人工林利用不同水分来源的比例。利用 SPSS 19.0, 通过单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析大扁杏林地各层土壤含水量的差异, 大扁杏枝条木质部水分和土壤水分的  $\delta^{18}\text{O}$  值的差异, 以及叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值的差异是否显著( $P < 0.05$ ), 如果显著, 再通过 Duncan 检验确定其差异性。

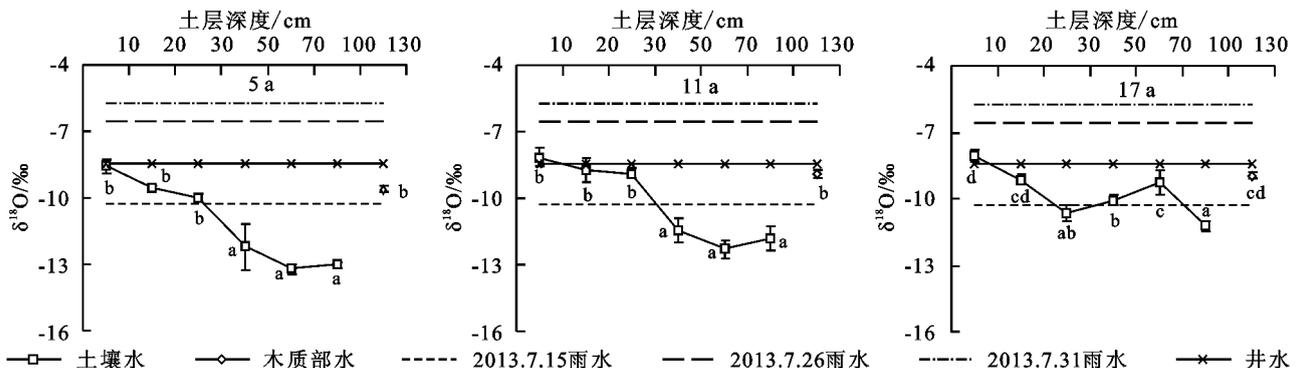
## 2 结果与分析

### 2.1 大扁杏林地土壤含水量

从图1可以看出, 各林龄大扁杏林地不同深度土壤含水量间均差异显著( $P < 0.05$ )。5年生大扁杏林地表层(0—10 cm)土壤含水量最低, 为 10.64%, 20—30 cm 处为 15.44%; 11年生大扁杏林地表层(0—10 cm)土壤含水量 10.91%; 10—30 cm 处逐渐升高, 70—100 cm 处为 15.48%; 17年生大扁杏林地表层(0—10 cm)土壤含水量最低, 为 7.91%, 70—100 cm 处为 14.18%。各林龄大扁杏林地土壤表层(0—10 cm)含水量均较低, 中层比较稳定(30—70 cm), 深层(70—100 cm)含水量相对较高。

$\delta^{18}\text{O}$  值为  $(-8.42 \pm 0.1)\text{‰}$ 。

$\delta^{18}\text{O}$  值表明, 5年和11年生大扁杏枝条木质部水分的  $\delta^{18}\text{O}$  值与其林地 0—30 cm 处土壤水分的  $\delta^{18}\text{O}$  值接近(图2); 17年生大扁杏枝条木质部水分的  $\delta^{18}\text{O}$  值与其林地 0—20 cm 和 50—70 cm 处土壤水分的  $\delta^{18}\text{O}$  值接近(图2)。同时, 这部分土壤水分的  $\delta^{18}\text{O}$  值均与 2013年7月15日的雨水(8.5 mm)的  $\delta^{18}\text{O}$  值接近, 并均与井水的  $\delta^{18}\text{O}$  值接近。



注: 图中不同小写字母表示大扁杏木质部水分与各层土壤水分的  $\delta^{18}\text{O}$  值差异显著( $P < 0.05$ )。

图2 大扁杏枝条木质部水分、土壤水分、雨水及井水的  $\delta^{18}\text{O}$  值

Iso-Source 分析表明,5年生大扁杏林主要利用0—30 cm深度的土壤水和地下水,分别占全部水分来源的57.2%和26.2%;11年生大扁杏林主要利用0—30 cm深度的土壤水和地下水,分别占全部水分来源的70.5%和25.5%;17年生大扁杏林主要利用0—20 cm和50—70 cm深度的土壤水以及地下水,土壤水占全部水分来源的55.8%,地下水占24.4%(表2)。

### 2.3 不同林龄大扁杏人工林的根密度

5,11,17年生大扁杏人工林的吸水根( $d \leq 1$  mm)均主要分布在0—30 cm土层深度范围,且吸水根密度随着林龄的增加而逐渐增加(图3)。5,11,17年生大扁杏人工林的输导根( $d > 1$  mm)分布的土层范围较吸水根

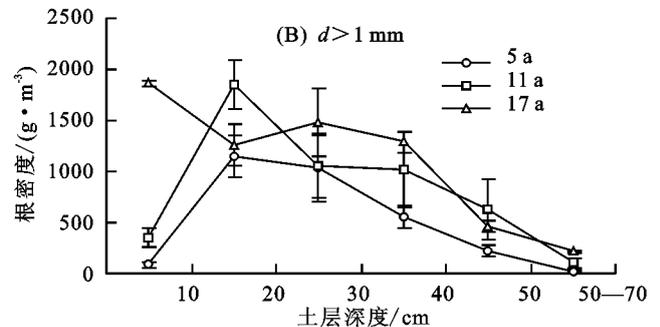
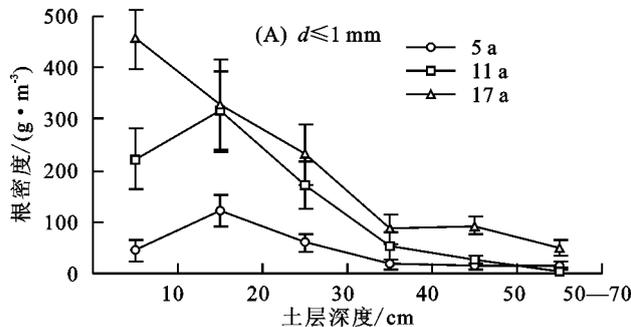
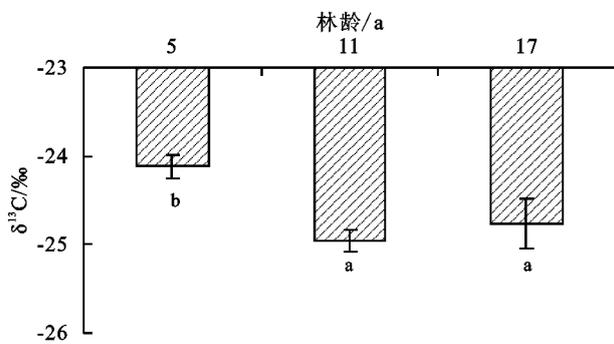


图3 不同林龄大扁杏人工林的根密度

### 2.4 不同林龄大扁杏林的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值

试验测定表明,大扁杏叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $\text{C}_3$ 植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围内( $-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$ ),因此大扁杏是 $\text{C}_3$ 植物,叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以反映其长期水分利用效率<sup>[4]</sup>。从图4可以看出,不同林龄大扁杏林的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值间存在显著差异( $P < 0.05$ )。5年生大扁杏林叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-24.1\text{‰}$ ,显著高于11年生和17年生大扁杏林( $P < 0.05$ ),这可能表明5年生大扁杏林可利用的水源相对较少。



注:图中不同小写字母表示不同林龄大扁杏林的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著( $P < 0.05$ )。

图4 不同林龄大扁杏林的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值

## 3 讨论

### 3.1 不同林龄大扁杏人工林的水分利用来源

土壤水是干旱和半干旱区植物生存、生长和繁殖的主要水分来源之一<sup>[3]</sup>。本研究表明,辽西地区不同林龄大扁杏人工林可利用不同深度的土壤水,5年生和11年生大扁杏林主要吸收林地0—30 cm深度的土壤水,17

大,其中,5,11年生大扁杏人工林的输导根主要分布在20—50 cm土层深度范围,17年生大扁杏人工林的输导根主要分布在10—70 cm土层深度范围(图3)。

表2 大扁杏人工林利用不同深度土层水分来源的比例

土层深度/cm	比例/%		
	5 a	11 a	17 a
0—10	0.253±0.174	0.463±0.194	0.272±0.152
10—20	0.177±0.158	0.139±0.125	0.150±0.135
20—30	0.142±0.127	0.103±0.095	0.064±0.059
30—50	0.064±0.058	0.016±0.02	0.083±0.075
50—70	0.050±0.046	0.011±0.016	0.136±0.122
70—100	0.052±0.048	0.014±0.018	0.050±0.048
井水	0.262±0.169	0.255±0.208	0.244±0.176

注:表中数据为平均值±标准差。

年生大扁杏林主要吸收林地0—20 cm和50—70 cm深度的土壤水(表2)。 $\delta^{18}\text{O}$ 值分析表明,不同林龄大扁杏吸收的土壤水主要由降雨和地下水补给而来。前人研究也发现植物对土壤水的利用会因其生长发育阶段的不同而产生变化<sup>[10-11]</sup>。生长在巴丹吉林沙漠东南缘绿洲—荒漠过渡带的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)人工林随着林龄的增长,能够利用更深层的土壤水:2年生梭梭人工林主要利用50—200 cm土壤水,5年生梭梭人工林主要利用100—200 cm土壤水,10年生梭梭人工林主要利用150—200 cm土壤水<sup>[10]</sup>;青海高寒沙区的乌柳(*Salix cheilophila*)人工林在幼龄期主要利用降雨补给的浅层土壤水,成龄期则可以同时利用降雨补给的浅层土壤水和地下水补给的深层土壤水<sup>[11]</sup>。

植物这种选择性利用水源的特性与其根系分布状况关系密切,尤其与吸水根在土壤中的分布密度呈正相关<sup>[12-13]</sup>。深根系植物主要利用更深层的土壤水或地下水,浅根系植物则倾向于利用夏季降水补给的浅层土壤水,而二态性根系植物可以利用深层和浅层土壤水<sup>[12]</sup>。生长在毛乌素沙地的油蒿(*Artemisia ordosica*)根密度在土壤表层最高,在50 cm土层处根密度最低,因此当地的油蒿主要利用表层的土壤水( $< 50$  cm),而臭柏(*Sabina vulgaris*)的根密度在地下水位高度(1.2 m)以上均较高,因此同时利用深层(150 cm)和浅层(50 cm)的土壤水<sup>[13]</sup>。本研究结果表明,大扁杏的吸水根主要分布在0—30 cm土层深度,而输导根主要分布在10—70 cm土层深度(图3),因此,大扁杏属于二态性根系植物,可以

同时利用浅层和深层土壤水。此外,随着林龄的增长,大扁杏人工林的吸水根密度逐渐增大,而且输导根主要分布的土层范围逐渐变深,这表明大扁杏人工林会随着林龄增大而更多地利用更深层的土壤水。

### 3.2 不同林龄大扁杏人工林的水分利用效率

本研究结果表明,林龄对大扁杏的长期水分利用效率存在显著影响。5年生大扁杏人工林的水分利用效率显著高于11年生和17年生大扁杏人工林(图4)。这可能是由于5年生大扁杏林的吸水根分布的土层深度相对较浅,并且根密度明显小于11年生和17年生大扁杏林(图3),致使其可利用的土壤水相对较少,因此采取了提高水分利用效率的策略以适应相对较高的水分胁迫。具体原因还需结合其他植物生理特征和环境因素进一步研究。许多研究报道了林龄对水分利用效率的影响<sup>[14-15]</sup>。生长在高寒沙区的中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*),其幼龄林的水分利用效率显著高于成龄林<sup>[14]</sup>。Casper等<sup>[15]</sup>在*Cryptantha flava*中提出了相反的结论,其成龄林水分利用效率显著高于幼龄林,他认为这是由于成龄植物在生长季保持较高的光合速率,而气孔导度却与幼龄植物相似的结果造成的。

对于干旱和半干旱区植物而言,植物的水分利用特征可能反映了植物对环境的适应策略<sup>[16]</sup>。以地下水为主要水源的植物通常比只依靠降水补给的浅层土壤水的植物具有更强的生存能力,特别是在遭受水分胁迫的时候<sup>[13]</sup>。因此,辽西半干旱地区大扁杏人工林能够同时利用雨水和地下水的策略,尤其是随着林龄的增长而在水分利用特征上的变化都将可能有助于其适应辽西地区的半干旱环境。未来仍需要测定大扁杏人工林水分利用特征的季节和年际动态,同时结合地下水长期监测等方面研究,才能更全面评价大扁杏人工林的适应性和稳定性。

## 4 结论

辽西地区大扁杏人工林在生长旺季(8月)主要利用降雨和地下水补给的土壤水,并且不同林龄大扁杏林主要利用的土壤水深度不同:5年生和11年生利用0—30 cm土壤水,17年生同时利用0—20 cm和50—70 cm土壤水,这是由其根系分布决定的(尤其是吸水根)。5年生大扁杏林的长期水分利用效率高于11年生和17年生大扁杏。大扁杏人工林在不同生长发育阶段因其根系分布的差异而具有不同的水分利用特征,将有助于其更好地适应辽西地区的半干旱环境。

致谢:本试验在进行期间得到了辽宁省干旱地区造林研究所的王世忠高级工程师,以及沈阳农业大学林学院研究生牛沙沙、王建卫的帮助,特此一并感谢!

### 参考文献:

[1] Ehleringer J R, Schwinning S, Gebauer R. Water use in arid land ecosystems[C]. // Press M C, Scholes J D, Barker M G, et al. Advances in plant physiological ecology. Oxford: Black-

well Science, 1999: 347-365.

- [2] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33(1): 507-559.
- [3] Chimmer R A, Cooper D J. Using stable oxygen isotopes to quantify the water source used for transpiration by native shrubs in the San Luis Valley, Colorado U. S. A. [J]. Plant and Soil, 2004, 260(1/2): 225-236.
- [4] Farquhar G D, Hubick K T, Condon A G. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency[C]. // Rundel P W, Ehleringer J R, Nagy K A. Stable Isotope in Ecological Research. New York: Springer-Verlag, 1989: 21-40.
- [5] Williams D G, Ehleringer J R. Intra- and interspecific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands [J]. Ecological Monographs, 2000, 70(4): 517-537.
- [6] Schwinning S, Starr B I, Ehleringer J R. Summer and winter drought in a cold desert ecosystem (Colorado Plateau) part I: Effects on soil water and plant water uptake[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 60(4): 547-566.
- [7] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 等. 樟子松人工固沙林衰退的主要特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2221-2224.
- [8] 洪新. 建平沙棘资源开发利用现状分析与对策[J]. 国际沙棘研究与开发, 2012, 10(2): 28-32.
- [9] 王慧新, 颜景波, 何跃, 等. 风沙半干旱区不同立体复合模式下大扁杏的光合特性[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 161-166.
- [10] Zhu Y J, Jia Z Q. Soil water utilization characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation with different age during summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 341-346.
- [11] 刘丽颖, 贾志清, 朱雅娟, 等. 青海共和盆地不同林龄乌柳林的水分利用策略[J]. 林业科学研究, 2012, 25(5): 597-603.
- [12] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phreatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation[J]. Oecologia, 1996, 107(1): 13-20.
- [13] 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.
- [14] Jia Z Q, Zhu Y J, Liu L Y. Different water use strategies of juvenile and adult *Caragana intermedia* plantations in the Gonghe Basin, Tibet Plateau [J]. PLoS One, 2012, 7(9): e45902.
- [15] Casper B B, Forseth I N, Wait D A. Variation in carbon discrimination in relation to plant performance in a natural population of *Cryptantha flava* [J]. Oecologia, 2005, 145(4): 541-548.
- [16] Schwinning S, Starr B I, Ehleringer J R. Dominant cold desert plants do not partition warm season precipitation by event size[J]. Oecologia, 2003, 136(2): 252-260.