

DOI: 10.5846/stxb201404050650

刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 邓海军, 方功焕. 基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究. 生态学报, 2016, 36(3): - .  
Liu S B, Chen Y N, Chen Y P, Deng H J, Fang G H. Study on the depth of water uptake by *Populus euphratica* trees of different ages in the lower reaches of the Heihe River, based on the stable isotope techniques. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

## 基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究

刘树宝<sup>1</sup>, 陈亚宁<sup>2,\*</sup>, 陈亚鹏<sup>2</sup>, 邓海军<sup>2</sup>, 方功焕<sup>2</sup>

1 新疆环境保护科学研究院, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

**摘要:** 水是影响陆地生态系统植被分布最重要的因素之一, 特别是在干旱地区, 水资源将是限制植物生长的关键因素。不同植物具有不同的吸水深度, 植物的吸水深度可影响它的分布区域, 因此, 精确测量植物的吸水深度对预测全球气候变化下植被的时空分布具有重要意义。稳定同位素技术逐渐被公认为是一种精确测量植物吸水深度的有效方法。本文利用稳定同位素技术分析不同林龄胡杨的吸水深度和不同林龄胡杨的水分利用效率, 对确定胡杨生存的合理地下水位、制定胡杨保育恢复策略具有重要意义。通过对黑河下游不同林龄胡杨木质部水及其不同潜在水源  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  的测定分析, 并运用深度模型计算了不同林龄胡杨的吸水深度, 探讨了不同林龄胡杨的水分利用效率。结果发现: 1) 不同林龄胡杨木质部  $\delta^{18}O$  差异显著, 胡杨幼苗、成熟木、过熟木的  $\delta^{18}O$  分别为  $-5.37‰$ 、 $-6.03‰$ 、 $-6.92‰$ ; 2) 不同林龄胡杨的平均吸水深度不同, 且具有随林龄变老而选择利用更深的土壤水分的特点: 胡杨幼苗的平均吸水深度为 37 cm, 胡杨成熟木的平均吸水深度为 145 cm, 胡杨过熟木的平均吸水深度为 149.5 cm。3) 不同林龄胡杨水分利用效率不同, 随林龄的变老水分利用效率具有降低的趋势。

**关键词:** 平均吸水深度; 胡杨;  $\delta D$ ;  $\delta^{18}O$

## Study on the depth of water uptake by *Populus euphratica* trees of different ages in the lower reaches of the Heihe River, based on the stable isotope techniques

LIU Shubao<sup>1</sup>, CHEN Yaning<sup>2,\*</sup>, CHEN Yapeng<sup>2</sup>, DENG Haijun<sup>2</sup>, FANG Gonghuan<sup>2</sup>

1 Xinjiang Academy of Environmental Protection Sciences, Urumqi 830011, China

2 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

**Abstract:** Water availability is one of the most important factors affecting vegetation distribution in terrestrial ecosystems, especially in arid regions. Plant species vary in their abilities to absorb water from different soil depths. The depth from which plant species obtain water directly determines their distributions. Therefore, quantifying the depth of water uptake of dominant species is critically important to defining and predicting vegetation spatiotemporal distributions under global change. Stable isotopes of oxygen and hydrogen have become an important tool for identifying the plant water uptake sources; this is because various water sources possess distinct oxygen or hydrogen isotope signatures. However, there has been little research on shifts in water sources with phenological development. Research on the mean depth of water uptake of trees of different ages is essential for formulating conservation strategies for the riparian tree, *Populus euphratica*. This study assessed the contributions of different potential water sources to *P. euphratica*. We used the Romero-Saltos model and levels of stable oxygen and hydrogen isotopes ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) in the xylem of *P. euphratica* individuals of different ages and in soil

基金项目: 自然科学基金项目(91025025)

收稿日期: 2014-04-05; 网络出版日期: 2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

water and groundwater along the lower Heihe River. For all the three age classifications (young forest, mature forest and over-mature forest), the shallowest soil water sample (5 cm in depth) had the highest or near highest measured values of  $\delta^{18}\text{O}$ : 4.4 ‰, 4.1 ‰, and 1.5 ‰, respectively.  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  decreased with increasing depth. The greatest rates of decrease occurred near the surface, reflecting evaporation of soil water near the surface. The similarity between deep soil and groundwater  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of for all forest ages strongly suggests that the deep soil water is derived from groundwater. We found significant differences in  $\delta^{18}\text{O}$  values in the xylem among different ages of *P. euphratica*. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of young, mature and over-mature forest reached  $-5.37\text{‰}$ ,  $-6.03\text{‰}$ , and  $-6.92\text{‰}$  respectively, reflecting the reliance of older trees on deeper sources of water with lower  $\delta^{18}\text{O}$  values, closer to those of groundwater. The mean depth of water uptake *P. euphratica* varied with age. The mean depths of water uptake of seedlings, mature and over-mature forest were 37, 145, and 149.5 cm, respectively. This indicates that *P. euphratica* accesses deeper soil moisture with age. The  $\delta^{13}\text{C}$  values of young, mature and over-mature forest were  $-26.30\text{‰}$ ,  $-27.53\text{‰}$ , and  $-29.03\text{‰}$ , respectively. Similarly, we found significant differences in  $\delta^{13}\text{C}$  values of leaves among different ages of *P. euphratica*. The water use efficiency of young, mature, and over-mature forest were different, and tended to decrease with age. For all ages of forest, soil moisture peaked between 100 and 200 cm depth, which it is close to the mean water uptake depth of *P. euphratica* of all ages.

**Key Words:** The mean depth of water uptake; *Populus euphratica*;  $\delta\text{D}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$

河岸林的更新和演替与河流有着密不可分的关系,河道的演化深刻影响着内陆河流域生态系统及其林分的组成和分布特征<sup>[1]</sup>。胡杨(*Populus euphratica* Oliv)作为干旱区内陆河流域荒漠河岸林的主要建群种,其生态学特征、抗逆性以及水分利用等问题等一直是众多学者关注的热点<sup>[2-5]</sup>。胡杨在中国西北干旱区内陆河流域广泛分布,它耐盐碱,抗干旱、风沙,具有重要的生态功能<sup>[6]</sup>,是联合国粮农组织林木基因资源专家组确定的全世界最急需优先保护的林木基因资源之一。近年来,李建林等依据在极端干旱区额济纳旗的实测资料,对胡杨根系及根区土壤水分特征进行了分析,建立了胡杨根系吸水的二维数学模型,模型结果与实测结果平均相对误差为 9.02%<sup>[7]</sup>。赵良菊等对黑河下游河岸植物的水分来源做了初步研究,结果表明,胡杨的主要吸水层位为地下水<sup>[8]</sup>。Romero-Saltos 等利用降水控制实验和吸水深度模型对亚马逊东部塔帕若斯河植物的水分来源进行了研究,结果发现在降水很少的干季,树木的吸水深度会不断加深。同时也指出,在干旱地区,树木可能有两个不同的水源或存在两个不同深度的吸水层位<sup>[9]</sup>。不少学者对塔里木河下游研究表明,地下水是维系胡杨的生存的重要水分来源<sup>[6,10-13]</sup>。

在 20 世纪 70 年代末,环境同位素技术就被逐渐引入到水文学、生态学等各个领域。随着稳定性同位素的发现和同位素分析技术的迅速发展,氢氧稳定同位素示踪技术逐渐被广泛应用到确定植物水分来源的研究当中。植物叶片组织中的稳定碳同位素组成能够解析植物的水分利用效率, Farquhar 等认为,植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值可以用来间接指示植物的长期水分利用效率<sup>[14]</sup>,大量的研究也证实  $\delta^{13}\text{C}$  值与植物水分利用效率存在高度相关性,可以作为衡量植物水分利用效率的有效指标<sup>[15]</sup>。运用稳定同位素法测定的植物叶片的  $\delta^{13}\text{C}$  值能直接指示植物的水分利用效率,已成为一种公认的估测植物长期水分利用效率的可靠途径。

在黑河下游,以胡杨为优势种的荒漠河岸林具有重要的保护生物多样性的生物学功能<sup>[8]</sup>。但是,随着近几十年来中上游用水量的增加,黑河下游额济纳地区来水量逐年减少<sup>[16]</sup>,导致地下水位的逐年下降,沙化、盐化等加速,造成胡杨林大面积退化,胡杨林分结构严重失衡,胡杨幼苗死亡更加严重,对胡杨林的更新造成很大的打击<sup>[17]</sup>。自 2000 年,黑河的分水使得下游生态环境有了一定的改善,地下水位普遍抬升,胡杨林内出现了成片的胡杨幼苗,河岸林生态系统逐渐好转。可见,黑河下游胡杨林的退化与更新和地下水位有直接的关系,尤其对胡杨幼苗的生长至关重要,但是对于胡杨因地下水位下降而退化和因地下水位升高而出现成片胡杨幼苗的机理方面的研究的案例较少,尤其是河岸林生态系统内不同植物吸水深度方面的研究更少。为此,本文通过对黑河下游河岸林生态系统内不同林龄胡杨样地土壤含水量及土壤水和木质部  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  和叶片  $\delta^{13}\text{C}$

C 的测定分析,解析不同林龄胡杨的平均吸水深度,探讨不同林龄胡杨的水分利用格局及其在干旱环境下的水分利用和适应机制,旨在为制定黑河下游生态用水配置方案和胡杨林的恢复、保护措施提供科学依据。

## 1 数据采集与方法

### 1.1 研究区概况

黑河发源于祁连山,全长 821 km,多年平均径流总量为  $24.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。主要由山区冰川(雪)融水、降水构成,是中国第二大内陆河。研究区额济纳盆地位于黑河流域下游,总面积约 30000  $\text{km}^2$ ,地理坐标为  $E 99^\circ 30' - 102^\circ 00'$ ,  $N 40^\circ 20' - 42^\circ 30'$ ,海拔 900—1130 m,北部和西部为马鬃山和阿尔泰山低山丘陵,东南部为巴丹吉林沙漠,南与鼎新盆地相邻。行政区划属内蒙古自治区阿拉善盟额济纳旗。该地区深居内陆,气候极端干旱,多年平均降水量 42 mm,年最大为 103 mm,最小为 7 mm;多年平均蒸发量为 3755 mm,最高达 4035 mm,蒸发量是降水量的 89 倍;多年平均气温  $8.2^\circ\text{C}$ ,盛行西北风,平均风速 4.2 m/s,最大风速 24.0 m/s。天然植被主要以乔木胡杨和与其伴生的灌木柽柳和草本植物苦豆子为主。

试验样地位于额济纳旗的乌兰图格(图 1),距黑河道 300 m 左右,地下水埋深在 2.5—3.2 m 之间,植物主要为胡杨和柽柳,林下伴生的草本稀少,多为苦豆子,覆盖度约为 50%,土壤由第四纪洪积、冲积物组成,以细砂土为主<sup>[18]</sup>。

### 1.2 样品采集与数据分析

#### 1.2.1 样品采集

在试验样地内分别选择具有代表性(长势良好,树干通直,冠幅适中,无病虫害)的胡杨幼苗、成熟木、过熟木各 3 棵,进行木质部取样,在其周围用土钻钻取土壤用于土壤水的提取和土壤含水量的测定,挖取的土壤深度直至含水饱和层(胡杨幼苗和成熟木的含水饱和层深度为 3.2 m、过熟木的为 2.6 m)。挖取过程中记录各层土壤质地(如细砂土或黏土),同时观察不同林龄胡杨根系主要分布深度。采样时间为 2012 年 8 月初,采样的前后几天内均无降雨产生也无凝结水生成。龄组划分参照林业部门的标准,各不同林龄胡杨基本特征见表 1。

#### (1) 土壤含水量测定

土壤含水量取样,幼龄林和成熟林样地土壤剖面 0—40 cm,每 10 cm 为一层,40—320 cm,每 20 cm 为一层。过熟林样地土壤剖面 0—40 cm 每 10 cm 为一层,40—260 cm,每 20 cm 为一层。每层 3 个重复。测定土壤含水量的土壤装入铝盒中,在试验地立即称鲜重并记录其鲜重,带回实验室于  $105^\circ\text{C}$  烘箱中烘干直到恒重后计算土壤含水量。

#### (2) 植物木质部取样

为消除气孔蒸腾作用造成的同位素富集,对于木质部的取样,选择超过二年的茎,直径 0.5 cm 左右,长在 5 cm 之内的枝条段,迅速将枝条段的外皮和韧皮部去除,保留木质部。

#### (3) 土壤水取样

土壤水同位素取样的土壤剖面的分层情况同土壤含水量取样,与土壤水取样同时进行,所取样品(植物木质部和土壤同位素样品)均迅速装入玻璃瓶内盖好瓶塞,利用 parafilm 封口膜予以密封并迅速放入冰盒,带回实验室。在进行同位素测定前,置于  $-20^\circ\text{C}$  冷冻。

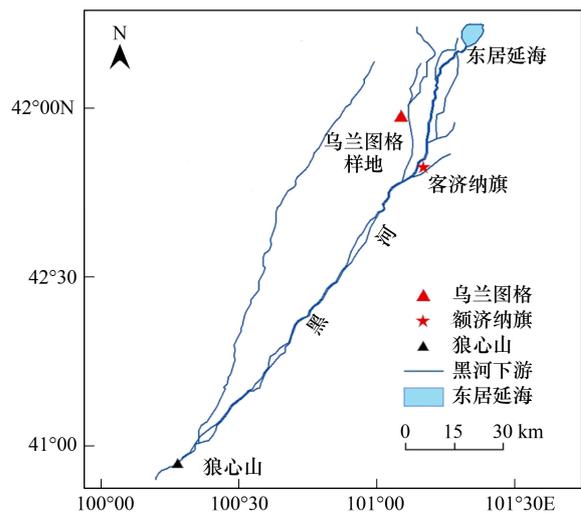


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 The Sketch map of study area

表 1 不同林龄胡杨基本特征

Table 1 Essential characteristic of different ages of *Populus euphratica*

特征 Characteristic	幼林龄 Young Forest	成熟林 Mature Forest	过熟林 over-mature Forest
树高(m) Height of tree	3.5	12.9	14.7
胸径(cm) Diameter at breast height	7	65	112
冠幅(m×m) Crown	1.2×1.5	6.7×7.5	10.3×11.6
林龄(a) Age	4—6	30—40	55—60
地下水水位 Groundwater level	320	320	260
土壤质地 Soil texture	0—110 cm 沙壤土, 110—130 cm 粘土, 130—320 cm 沙土。	0—70 cm 沙壤土, 70—90 cm 粘土, 90—180 cm 沙土, 180—200 cm 粘土, 200—320 cm 沙土	0—110 cm 沙壤土, 110—130 cm 粘土, 130—250 cm 沙土。
根系主要分布层(cm) Root distribution	20—40	60—120	60—160
林下主要植被 Understory vegetation	苦豆子, 骆驼蓬, 蒲公英	稀疏苦豆子,	极少苦豆子
覆盖度 Coverage	0.7	0.5	0.3

#### (4) 地下水取样

地下水样取自附近观测井。2010 年 10 月在黑河下游额济纳旗的乌兰图格建成一条生态监测断面,沿垂直于河道的方向布设 7 口生态监测井,不同林龄胡杨样地附近的井水代表地下水测定其的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值。

#### (5) 叶片取样

在木质部取样的同时进行叶片取样,选择生长良好,无病虫害的绿色叶片,每棵树取 20—30 片叶子。把晾干后的叶子放入烘箱在 105 °C 杀青,之后在 60 °C 下干燥样品 48 h 至恒重,然后将样品粉碎过 0.15 mm 的筛子,取约 5.0 mg 样品,用锡箔包装好后制备成供测样品。

### 1.2.2 水分提取和样品分析

土壤水和植物木质部水分采用低温真空蒸馏法提取<sup>[9]</sup>。在荒漠与绿洲生态国家重点实验室用 Isoprime100 稳定同位素质谱仪测量地下水、枝条木质部水分和土壤各层水分的稳定氢和氧同位素比率和叶片碳同位素比率:

$$\delta D(\text{‰}) = ((R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1) \times 1000 \quad (1)$$

$$\delta^{18}O(\text{‰}) = ((R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1) \times 1000 \quad (2)$$

$$\delta^{13}C(\text{‰}) = ((R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1) \times 1000 \quad (3)$$

其中,公式(1)、(2)和(3)中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  和  $\delta^{13}C$  和分别为对应样品的稳定氢、氧和碳同位素值,  $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{standard}}$  分别为样品和国际通用标准物中元素的重轻同位素丰度之比(如  $^{18}O/^{16}O$ )。精度( $^{18}O/^{16}O$ ) 优于 0.1‰,  $D/H$  优于 0.3‰,  $^{13}C/^{12}C$  优于 0.2‰。  $\delta D$  值的测试误差不超过 1‰,  $\delta^{18}O$  和  $\delta^{13}C$  值的测试误差不超过 0.2‰。

### 1.2.3 数据分析

不同林龄胡杨的平吸水深度用深度模型进行分析<sup>[9]</sup>,该模型是由 Romero-Saltos 等在 2005 年提出的模型方法,模型以同位素质量守恒为前提,植物茎木质部水中的同位素的值是土壤各深度处的水分同位素值按比例混合的结果。该模型结合 MATLAB 软件,利用观察到的平均  $\delta D$  的值所计算出的方差来计算预期的土壤中每厘米氘同位素的值。模型估计在确定一棵树所吸水的平均深度是有两个假设:假设一,在任何时间,植物都可以吸收 50 cm 处的水分。假设二,植物在土壤不同深度吸水服从正态分布(见公式 4)。模型还有一个公理:质量平衡原理。模型可计算每厘米处土壤中同位素的值,从地表直到计算的最底部。

模型具体算法如下:先输入土壤采样的深度,各深度处土壤样品的氘同位素的值,其次输入植物样品中的氘同位素值,再次输入植物吸收土壤水的标准方差。(例如:如果植物被认为能从土壤中 50 cm 深度处吸收

水分时,标准偏差定为 8.33 cm)。输入之后由 1 开始计算,计算间隔设为 1 cm,这样每一厘米的土壤水中的氘同位素的值算出的贡献率都可以知道,模型可以算出植物具体吸收哪一平均深度的土壤水分。

$$n_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(Y-\mu)^2 / 2\sigma^2} \quad (4)$$

式中,  $n_i$  是植物根在 Y 深度处所吸收的水分的比例,  $\mu$  是根在土壤中所吸收水分的平均深度,  $\sigma$  是标准偏差值为 8.33 cm,  $n_i$  的总和为 1。

不同土层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  的差异及不同林龄胡杨  $\delta^{18}\text{O}$  的差异用 SPSS 17.0 统计软件分析。采用 Origin 进行图表绘制。

## 2 结果分析

### 2.1 不同林龄胡杨土壤剖面含水量的变化

不同林龄胡杨土壤剖面含水量随土壤深度的变化而变化(图 2),其中,幼苗土壤剖面的含水量高于过熟木高于成熟木,根据不同林龄胡杨土壤剖面含水量情况可大致分为三个区间,即:

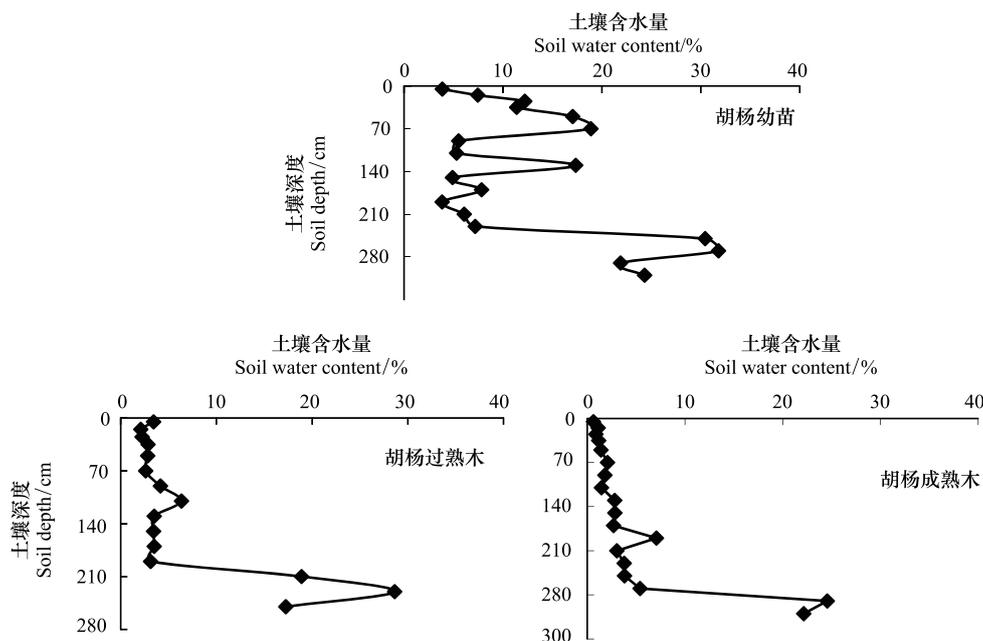


图 2 黑河下游河岸林不同林龄胡杨土壤剖面含水量变化

Fig. 2 Variations of soil water content in soil profile of Riparian forest of different ages of *Populus Euphratica* in the lower reaches of the Heihe Basin

1) 第一个区间为土壤深度小于 100 cm 的范围。在这个深度范围内,幼苗高于过熟木高于成熟木(图 2)。成熟木和过熟木的土壤剖面含水量变化不大,含水量都缓慢上升,成熟木的土壤含水量变化范围在 0.64%—2.08%;过熟木的土壤含水量变化范围在 2.09%—4.15%;幼苗土壤剖面的含水量变化范围在 3.86%—18.89%,且在 40—80 cm 出现了一个含水量高峰,在此深度范围土壤质地为沙壤土,与周围土层没有区别,因此,出现这个“峰”值可能与胡杨幼苗的根系分布等有关。

2) 第二个区间为土壤深度 100—200 cm。在这个区间,不同林龄胡杨土壤剖面含水量都出现了一个含水量的高峰,胡杨幼苗在 120—140 cm 处出现了第二个“峰”,峰值处含水量为 17.35%。成熟木土壤剖面的含水量在 180—200 cm 出现了一个“峰”,峰值处含水量为 7.08%。过熟木土壤剖面的含水量在 100—120 cm 出现了一个“峰”,峰值处含水量为 6.34%。这些峰值的出现是该层土壤为粘土所致,但成熟木和过熟木的峰值都远远小于幼龄林的峰值。胡杨幼苗土壤剖面的含水量和峰值都高于成熟木和过熟木的,这可能与成熟胡杨耗

水量高于胡杨幼苗的有关<sup>[19]</sup>。

3) 第三个区间为土壤深度 200 cm 至地下水水位处(胡杨幼苗、成熟木为 320 cm, 过熟木为 260 cm。), 在这个区间, 胡杨幼苗、成熟木和过熟木土壤剖面的含水量都在接近地下水水位时忽然出现了一个含水量最高峰, 峰值分别为 31.79%、24.55% 和 28.63%, 这是地下水直接补给该层土壤水分的原因。这个也可在下文中通过对比深层土壤水的  $\delta^{18}\text{O}$  接近地下水  $\delta^{18}\text{O}$  得出此结论。

## 2.2 不同林龄胡杨吸水层位

从胡杨木质部水的测试结果可知, 胡杨幼苗、成熟木、过熟木的  $\delta^{18}\text{O}$  分别是  $-5.37\text{‰}$ ;  $-6.03\text{‰}$ ;  $-6.92\text{‰}$ 。不同林龄胡杨木质部的  $\delta^{18}\text{O}$  值差异呈极显著 ( $P < 0.001$ ), 胡杨幼苗高于胡杨成熟木高于胡杨过熟木, 不同林龄胡杨木质部  $\delta^{18}\text{O}$  值差异显著, 这可能和不同林龄胡杨的主要吸水层位有关。

不同林龄胡杨土壤剖面不同深度的土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  存在较大差异, 并呈规律性变化, 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  随深度加深呈逐渐降低的趋势, 不同林龄胡杨土壤剖面都在 5 cm 深度左右出现了  $\delta^{18}\text{O}$  最大值(图 3)。胡杨幼苗、成熟木和过熟木土壤剖面  $\delta^{18}\text{O}$  最大值分别为  $4.36\text{‰}$ 、 $4.09\text{‰}$  和  $1.52\text{‰}$ 。在 5 cm 以下深度, 土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  总体上随深度增加而逐渐减小。胡杨幼苗土壤剖面在 0—30 cm 蒸发较强烈,  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $4.36\text{‰}$  —  $-3.44\text{‰}$ 。自 60 cm 至 320 cm  $\delta^{18}\text{O}$  值波动较小, 值在  $-7.00\text{‰}$  左右, 且接近地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  值 ( $-6.94\text{‰}$ ); 胡杨成熟木土壤剖面在 0—120 cm  $\delta^{18}\text{O}$  值从  $4.09\text{‰}$  降到  $-3.57\text{‰}$ , 减小的速度较快; 120—200 cm  $\delta^{18}\text{O}$  值在  $-5.00\text{‰}$  左右波动, 减小的幅度变缓; 200—320 cm  $\delta^{18}\text{O}$  值在  $-7.1\text{‰}$  —  $-7.4\text{‰}$  之间波动, 且接近地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  值 ( $-6.94\text{‰}$ ), 胡杨过熟木土壤剖面在 0—100 cm  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $1.52\text{‰}$  —  $-6.14\text{‰}$ , 120—260 cm  $\delta^{18}\text{O}$  值在  $-7.00\text{‰}$  左右波动, 且非常接近地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  值 ( $-6.94\text{‰}$ )。在接近地下水水位之前, 不同林龄胡杨样地土壤水的  $\delta^{18}\text{O}$  值都接近地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 这主要是由于底部土壤受地下水补给影响大的原因。不同林龄胡杨样地的土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化都与其深度呈指数关系(图 3), 表明土壤剖面在上界面受连续蒸发作用, 下界面接受潜水的连续补给<sup>[20]</sup>。

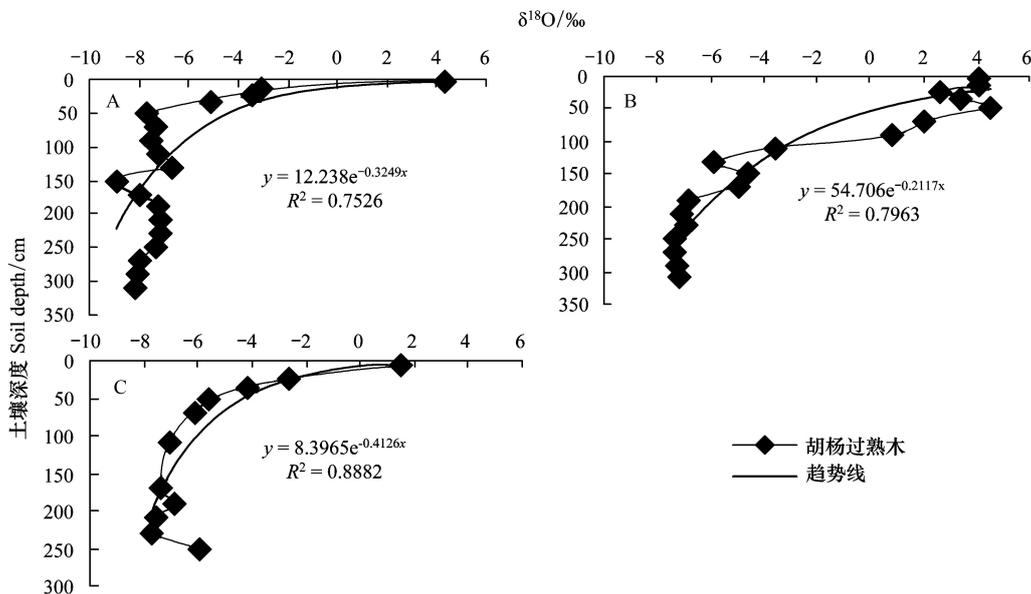


图 3 不同林龄胡杨样地  $\delta^{18}\text{O}$  值与深度关系

Fig. 3 The relations of  $\delta^{18}\text{O}$  values and depth for samples of different ages of *Populus euphratica*

本研究将土壤水和胡杨木质部水的  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  进行对比, 以胡杨木质部水为标准, 寻找  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$  同位素组成与之相同的土壤水所处的区间, 该区间即为胡杨吸收土壤水的主要层位。

将胡杨幼苗、成熟木和过熟木木质部水的  $\delta^{18}\text{O}$  与不同深度土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  对比发现(图 4): 胡杨幼苗(图 4A)  $\delta^{18}\text{O}$  相交于与土壤水 30—40 cm 深度处; 胡杨成熟木(图 4B)  $\delta^{18}\text{O}$  相交于与土壤水 170—190 cm 深度处; 胡杨过熟木(图 4C)  $\delta^{18}\text{O}$  相交于与土壤水 70—100 cm、190—210 cm、230—250 cm 深度处。

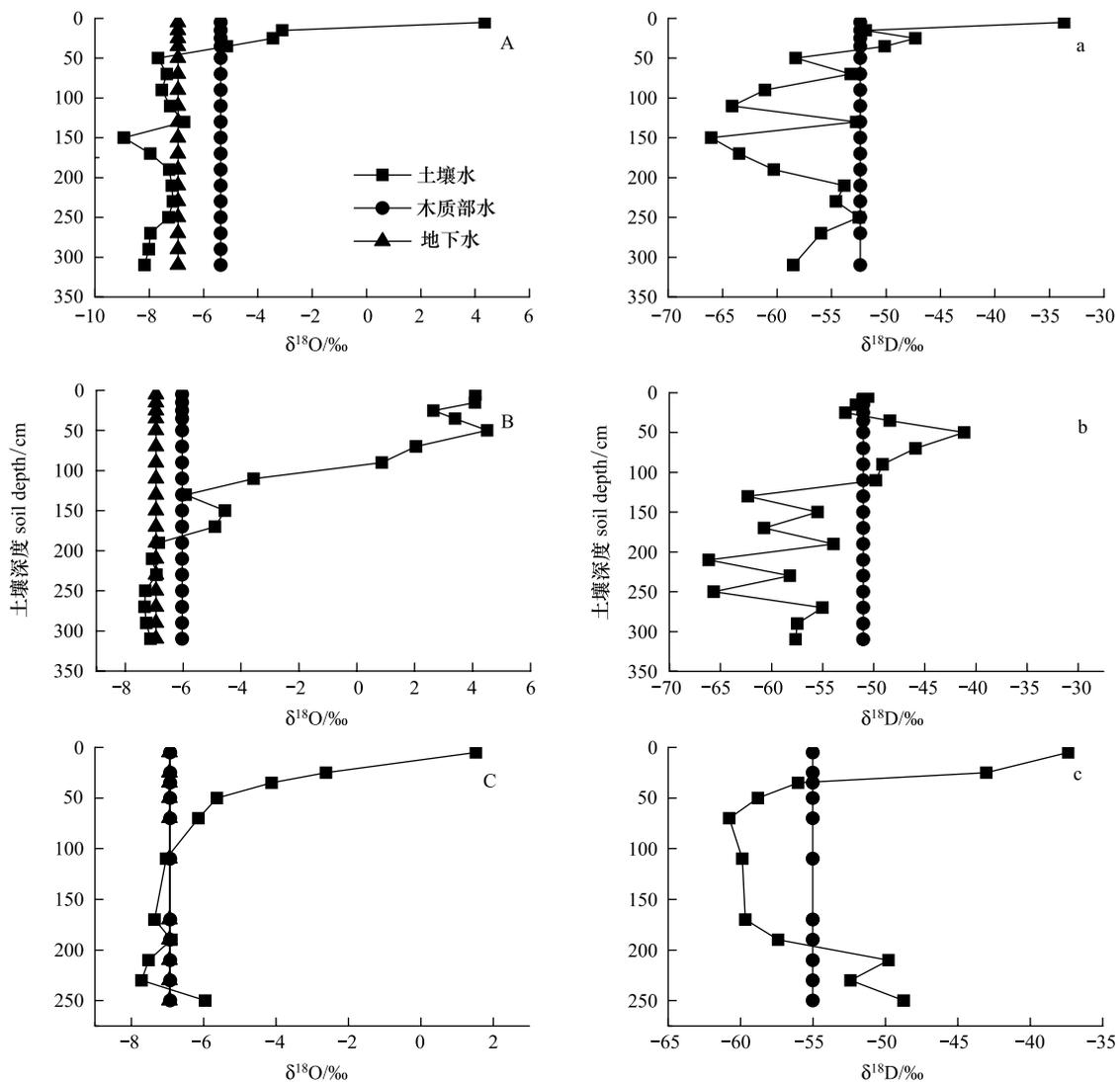


图 4 不同林龄胡杨样地土壤水、地下水和木质部水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值比较

Fig. 4 Comparison of  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  values of soil water and xylem water and ground water from the sample of different ages of *P. euphratica*

将胡杨幼苗、成熟木和过熟木木质部水的  $\delta D$  与不同深度土壤水  $\delta D$  对比发现(图 4):胡杨(图 4a)  $\delta D$  相交于与土壤水 35—50 cm 深度处,接近 130 cm 和 210—250 cm;胡杨成熟木(图 4b)  $\delta D$  值相交于与土壤水 15—35 cm 和 110—130 cm 深度处,胡杨过熟木(图 4c)  $\delta D$  值相交于与土壤水 25—35 cm 和 190—210 cm 深度处。

通过对比不同林龄胡杨木质部水的  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  和不同深度土壤水  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$ ,结果胡杨幼苗的主要吸水层位基本相同,而胡杨成熟木和过熟木有所差别。

### 2.3 不同林龄胡杨的平均吸水深度

吸水深度模型图结合 MATLAB 软件的计算结果如图所示。

$\delta^{18}O$  计算的胡杨幼苗、成熟木、过熟木的平均吸水深度依次为 36 cm、182 cm、104 cm(图 5)。

$\delta D$  计算的胡杨幼苗、成熟木、过熟木的平均吸水深度依次为 38 cm、26 cm 和 108 cm、39 cm 和 195 cm,其中测得胡杨成熟木、过熟木的平均吸水深度为两个值(26 cm 和 108 cm 和 39 cm 和 195 cm)(图 5)。

由  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  计算得出的胡杨幼苗吸水深度基本相同,位于 36—38 cm 之间,这和通过对比土壤水  $\delta^{18}O$  和胡杨幼苗木质部水的  $\delta^{18}O$  得出的胡杨幼苗的主要吸水层位位于 30—40 cm 之间的结果一致,而由  $\delta D$  和

$\delta^{18}\text{O}$  计算得出的胡杨成熟木和过熟木的结果相差较大,由  $\delta^{18}\text{O}$  计算得出的胡杨成熟木吸水深度深于胡杨过熟木,相反的,由  $\delta\text{D}$  计算得出的胡杨过熟木吸水深度深于胡杨成熟木。由  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  计算的胡杨成熟木和过熟木的结果相差较大。究其原因,可能与氢氧同位素的分馏速度不一致有关,不同林龄胡杨  $\delta\text{D}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  关系见图 6。

#### 2.4 不同林龄胡杨的水分利用效率

通过比较不同林龄胡杨  $\delta^{13}\text{C}$  的变化(图 7),结果表明,林龄对胡杨叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响达到显著水平( $P < 0.05$ )。其中,胡杨幼苗叶片  $\delta^{13}\text{C}$  显著高于胡杨成熟木高于胡杨过熟木,胡杨叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值在 C3 植物的叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值范围内( $-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$ ),叶片的  $\delta^{13}\text{C}$  值可以反映它的长期水分利用效率<sup>[21]</sup>。

### 3 结论与讨论

不同林龄胡杨土壤剖面水分的显著差异主要与土壤质地、胡杨根系在土壤剖面的分布及胡杨水分利用等有关。观察试验发现,在每个剖面中都出现了含水量的高峰,而不同林龄胡杨的平均吸水深度都接近含水量的高峰,这与刘丽颖研究的高寒沙地中间锦鸡儿吸水根集中分布区域土壤含水量明显降低的结果不同<sup>[22]</sup>。

不同林龄胡杨样地不同深度的土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值存在较大差异,总体上随深度增加而逐渐减小。主要原因是干旱区降水对土壤水补给较少,因而,土壤剖面的上界面受到连续蒸发作用,下界面则接受潜水的连续补给,从而造成了不同深度的土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值存在较大差异,这与前人的研究结果相似<sup>[23-25]</sup>。不同样地土壤剖面都在 5 cm 深度左右出现了  $\delta^{18}\text{O}$  最大值,在 5 cm 以下深度,土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  总体上随深度增加而逐渐减小。不同林龄胡杨样地的土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  值变化都与其深度呈指数关系,表明土壤剖面在上界面受连续蒸发作用,使得表层土壤水重同位素表现出明显的富集,下界面接受潜水的连续补给,使得与表层土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值存在较大差异。

#### 3.1 不同林龄胡杨的主要吸水层位

通过对比不同林龄胡杨木质部和不同土层土壤水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ,结果表明,虽然不同林龄胡杨主要吸水层位有些不同,但有些吸水区域是重合的,对比得出的胡杨幼苗吸水层位基本相同,重合区间位于 35—40 cm 之间,而通过对比  $\delta\text{D}$  还得出,胡杨幼苗  $\delta\text{D}$  与 130 cm 和 210—250 cm 处土壤水  $\delta\text{D}$  接近,由于胡杨幼苗主要吸水根系位于土壤表层,因此排除 130 cm 和 210—250 cm,认为胡杨幼苗主要利用 35—40 cm 之间的土壤水。

对比  $\delta\text{D}$  发现,胡杨成熟木  $\delta\text{D}$  值相交于与土壤水 15—35 cm 和 110—130 cm 深度处,但胡杨成熟木在 15—35 cm 之间土壤含水量低,且取样过程中未见根系分布,因此排除 15—35 cm,结合对比  $\delta^{18}\text{O}$  的结果,认为胡杨成熟木主要利用 110—130 cm 和 170—190 cm 之间的土壤水。

对比  $\delta\text{D}$  发现,胡杨过熟木  $\delta\text{D}$  值相交于与土壤水 25—35 cm 和 190—210 cm 深度处。胡杨过熟木在 25—35 cm 之间土壤含水量低,且取样过程中未见根系分布,因此排除 25—35 cm。结合对比  $\delta^{18}\text{O}$  的结果,胡杨过熟木  $\delta^{18}\text{O}$  值相交于与土壤水 70—100 cm、190—210 cm、230—250 cm 深度处,认为胡杨过熟木主要利用 190—210 cm 之间的土壤水。

#### 3.2 不同林龄胡杨的平均吸水深度

吸水深度模型计算结果显示,用  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  分别测定的胡杨幼苗的吸水深度非常接近,为 37 cm,同时也和通过对比土壤水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  和胡杨幼苗木质部水的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  得出的结论(胡杨幼苗主要利用 35—40 cm 之间的土壤水)一致,该吸水深度也符合胡杨幼苗吸水根系的分布范围<sup>[19]</sup>。

计算胡杨成熟木、过熟木的平均吸水深度时都出现了两个值(26 cm、108 cm 和 39 cm、195 cm),这种现象仅仅存在于干旱地区<sup>[18]</sup>。参考巩国丽<sup>[5]</sup>在确定柴达木盆地南部白刺吸水深度的研究结果,认为土壤含水量低的该深度的土壤水不是植物所吸收的水。由于成熟木和过熟木在 26 cm 和 39 cm 处土壤含水量很低,且没有根系分布,因此认为成熟木和过熟木的平均吸水深度为 108 cm 和 195 cm。

$\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  测定的胡杨成熟木的平均吸水深度在 108—182 cm 之间,再结合通过对比土壤水和胡杨木质部水的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  结果,木质部  $\delta^{18}\text{O}$  值与土壤水  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  值相交于 110—130 cm 和 170—190 cm 深度处,108 cm

非常接近 110—130 cm, 182 cm 处于由于 170—190 cm 之间, 因此认为胡杨成熟木的平均吸水深度为  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  测定的吸水深度的平均值 145 cm。

$\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  测定的胡杨过熟木的平均吸水深度在 104—195 cm 之间, 胡杨过熟木  $\delta^{18}O$  值与土壤水  $\delta^{18}O$  值相交于 70—100 cm、190—210 cm、230—250 cm 深度处, 作者认为胡杨过熟木的主要吸水层位首先排除 230—250 cm, 因为在接近地下水位的 250 cm 处的  $\delta^{18}O$  值远离地下水的  $\delta^{18}O$  值, 可能原因是在采样、真空抽提等过程中出现了误差, 再结合通过对比土壤水和过熟木木质部水的  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  结果, 木质部  $\delta^{18}O$  值与土壤水  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  值相交于 70—100 cm 和 190—210 cm 深度处, 104 cm 非常接近 70—100 cm, 195 cm 处于由于 190—210 cm 之间, 认为胡杨过熟木的平均吸水深度为  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  测定的吸水深度的平均值 149.5 cm, 位于两主要吸水层位 70—100 cm 和 190—210 cm 之间。

通过运用吸水深度模型并结合通过对比土壤水和胡杨木质部水的  $\delta^{18}O$  值的结果显示, 胡杨幼苗的平均吸水深度为 37 cm 之间, 胡杨成熟木的平均吸水深度为 145 cm 之间, 胡杨过熟木的平均吸水深度为 149.5 cm 之间, 同时也处于主要吸水层位之间。表明不同林龄胡杨的平均吸水深度不同, 会随林龄变化而选择性地利用不同深度的土壤水分。而刘丽颖等利用稳定同位素技术, 测定了共和盆地不同林龄中间锦鸡儿枝条木质部和土壤各层水分的值, 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, 结果表明: 中间锦鸡儿均主要利用源自降雨的土壤浅层 10—50 cm 的水分, 不会随林龄变化而选择性地利用不同深度的土壤水分<sup>[20]</sup>, 这和我们研究的胡杨会随林龄变化而选择性地利用不同深度的土壤水分结果相反, 究其原因, 主要和不同植物的根系分布及水分利用策略有关。

### 3.3 不同林龄胡杨的水分利用效率

稳定碳同位素的测量结果表明, 不同林龄胡杨水分利用效率差异显著, 随着年龄的增长, 胡杨具有较低的水分利用效率, 胡杨幼苗与成熟木和过熟木相比, 具有相对较高的水分利用效率。胡杨幼苗平均株高 3.5 m, 平均冠幅 1.2 m × 1.5 m, 根系分布土层较浅, 主要分布在 20—40 cm。胡杨幼苗木质部水分的  $\delta D$  值、 $\delta^{18}O$  值与地下水的值均差异较大, 表明胡杨幼苗没有利用地下水, 这就可能致使胡杨幼苗在缺水季节受到一定的水分胁迫, 导致其  $\delta^{13}C$  值明显高于成熟木和过熟木, 加之黑河下游降雨稀少, 蒸发强烈, 胡杨幼苗更易受到水分胁迫, 因此, 胡杨幼苗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。而胡杨成熟木和过熟木具有较深和较广的根系分布, 具有较稳定的水分来源(深层土壤水和地下水), 这样就不容易受到水分胁迫, 因此, 具有相对较低的水分利用效率。比较胡杨成熟木(60—120 cm)和过熟木(60—160 cm)根系分布范围, 过熟木具有更深的分布范围, 表明胡杨过熟木更容易利用稳定的水源(地下水), 导致其  $\delta^{13}C$  值低于成熟木, 具有较低的水分利用效率。这也从侧面说明, 随着胡杨林龄的增长, 会选择利用更稳定的水分来源来应对干旱胁迫。

表明不同林龄胡杨的平均吸水深度不同, 随林龄变化而选择性地利用不同深度的土壤水分, 以避免水分竞争。成熟胡杨选择利用较深的土壤水及地下水, 可减少表层土壤水分的耗散, 使胡杨幼苗和草本植物有更多的水分供给, 保证胡杨幼苗的成活率和天然更新。有文章指出胡杨过熟木会将体内多余的水分释放到土壤表层, 供给幼龄胡杨生长所需<sup>[26]</sup>。长此以往, 过熟胡杨充当了供给水分的物种, 一部分水分供给幼龄胡杨使用, 从而, 保证了胡杨幼苗的生长。在本文中, 胡杨幼苗样地土壤含水量在 40—80 cm 出现一个含水量的高峰, 这也从侧面解释了胡杨过熟木可能存在水力提升现象。

### 参考文献 (References):

- [1] 赵振勇, 王让会, 孙洪波, 张慧芝. 塔里木河下游输水廊道植被恢复的生态学评价. 科学通报, 2006, 51(增刊): 31-35.
- [2] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 徐长春, 张丽华. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复. 生态学报, 2007, 27(2): 538-545.
- [3] 陈亚鹏, 陈亚宁, 徐长春, 李卫红, 付爱红. 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响. 生态学报, 2011, 31(2): 344-353.
- [4] 司建华, 冯起, 李建林, 赵健. 荒漠河岸林胡杨吸水根系空间分布特征. 生态学杂志, 2007, 26(1): 1-4.

- [ 5 ] 巩国丽, 陈辉, 段德玉. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较. 生态学报, 2011, 31(24): 7533-7541.
- [ 6 ] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 刘加珍, 张宏峰, 程亚鹏. 塔里木河下游地下水水位对植被的影响. 地理学报, 2003, 58(4): 542-549.
- [ 7 ] 李建林, 冯起, 司建华, 常宗强, 巨登三, 郭巧玲. 极端干旱区胡杨根系吸水的二维数学模型. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1188-1193.
- [ 7 ] Li J L, Feng Q, Si J H, Chang Z Q, Ju D S, Guo Q L. Two-dimensional model of *Populus euphratica* root water uptake in extremely arid region of China. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(6): 1188-1193.
- [ 8 ] 赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 宋耀选, 赵亮, 李彩芝, 杨秋. 黑河下游河岸林植物水分来源初步研究. 地球学报, 2008, 29(6): 709-718.
- [ 9 ] Romero-Saltos H, Sternberg L da S L, Moreira M Z, Nepstad D C. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. American Journal of Botany, 2005, 92(3): 443-455.
- [ 10 ] 木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 苏芮. 极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征. 生态学报, 2012, 32(9): 2748-2758.
- [ 11 ] 陈亚鹏, 陈亚宁, 李卫红, 张宏峰. 塔里木河下游干旱胁迫下的胡杨生理特点分析. 西北植物学报, 2004, 24(10): 1943-1948.
- [ 12 ] 邓潮洲, 张希明, 李利, 吴俊侠, 刘国军, 闫海龙, 朱军涛, 吕朝燕. 河道输水对塔里木河下游胡杨生长状况的影响. 中国沙漠, 2010, 30(2): 312-318.
- [ 13 ] 孙卫, 侯平, 李霞. 胡杨枝直径生长对塔里木河下游应急输水的响应. 生态学报, 2006, 26(9): 2913-2917.
- [ 14 ] Farquhar G D, Richards R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11(6): 539-552.
- [ 15 ] Ebdon J S, Kopp K L. Relationships between water use efficiency, carbon isotope discrimination, and turf performance in genotypes of Kentucky bluegrass during drought. Crop Science, 2004, 44(5): 1754-1762.
- [ 16 ] 赵文智, 常学礼, 李秋艳. 人工调水对额济纳胡杨荒漠河岸林繁殖的影响. 生态学报, 2005, 25(8): 1987-1993.
- [ 17 ] 张武文, 史生胜. 额济纳绿洲地下水动态与植被退化关系的研究. 冰川冻土, 2002, 24(4): 421-425.
- [ 18 ] 张俊, 孙自永, 余绍文. 黑河下游额济纳盆地地下水系统划分. 地下水, 2008, 30(1): 12-14.
- [ 19 ] 李建林, 冯起, 司建华. 极端干旱区胡杨吸水根系的分布与模拟研究. 干旱区地理, 2008, 31(1): 97-101.
- [ 20 ] 周辰昕, 孙自永, 余绍文. 黑河中游临泽地区沙丘植物水分来源的 D、<sup>18</sup>O 同位素示踪. 地质科技情报, 2011, 30(5): 103-109.
- [ 21 ] Blum A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. Field Crops Research, 2009, 112(2/3): 119-123.
- [ 22 ] 刘颖, 贾志清, 朱雅娟, 刘君梅, 杨德福, 魏登贤. 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿的水分利用策略. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 119-125.
- [ 23 ] Phillips D L. Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: a critique. Oecologia, 2001, 127(2): 166-170.
- [ 24 ] 余绍文, 孙自永, 周爱国, 张溪, 段丽军, 许书刚. 用 D、<sup>18</sup>O 同位素确定黑河中游戈壁地区植物水分来源. 中国沙漠, 2012, 32(3): 717-723.
- [ 25 ] Dawson T E, Ehleringer J R. Isotopic enrichment of water in the "woody" tissues of plants: implications for plant water source, water uptake, and other studies which use the stable isotope composition of cellulose. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(14): 3487-3492.
- [ 26 ] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红, 郭斌, 赵锐锋. 胡杨根系水力提升作用的证据及其生态学意义. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1125-1131.