

塔里木河流域不同林龄胡杨与柽柳的水分利用策略研究

王勇^{1,2}, 赵成义¹, 王丹丹^{1,2}, 傅思华^{1,2}, 周天河³

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 赣州水务集团有限责任公司, 江西 赣州 341000)

摘要: 基于稳定同位素方法研究了塔里木河流域胡杨和柽柳的水分来源及分布特征, 探讨了塔里木河流域胡杨和柽柳的水分利用策略。结果表明:(1)胡杨和柽柳的植物水与土壤水的降水偏离程度与地下水存在显著差异($P < 0.05$), 表明土壤中存在不完全混合的水源库, 与植物耗水和地下水补给存在动态联系;(2)不同林龄胡杨和柽柳土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土壤深度增加均呈下降趋势, 受蒸发作用影响, 表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动明显;(3)不同林龄胡杨和柽柳水分利用来源存在差异, 胡杨和柽柳对土壤水的吸收利用随林龄增加层位下移。无论在幼苗阶段或成熟阶段, 柽柳利用土壤水的深度均低于胡杨, 表明其适应干旱环境的能力更强。

关键词: 胡杨; 柽柳; 林龄; 水分利用策略; 稳定同位素

中图分类号: Q945.17; S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2017)06-0157-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.026

Water Use Strategies of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* at Different Ages in Tarim River Basin

WANG Yong^{1,2}, ZHAO Chengyi¹, WANG Dandan^{1,2}, FU Sihua^{1,2}, ZHOU Tianhe³

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of

Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2. University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049; 3. GanZhou Water Group Co., Ltd, Ganzhou, Jiangxi 341000)

Abstract: Based on the stable isotope method, The water use patterns and strategies of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* at different ages were studied in Tarim River Basin. The results showed that: (1) precipitation offset of plant and soil water were significantly different from that of groundwater, indicating that there were two inhomogeneous and incompletely mixed water reservoirs that supply either for the plant water fluxes or the fluxes of groundwater. (2) The $\delta^{18}\text{O}$ value of surface soil water fluctuated widely, which was affected by evaporation, and the $\delta^{18}\text{O}$ value of soil water decreased gradually with the increasing soil depth. (3) The water used by the *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* with different ages came from different sources. The deeper soil water could be accessed after the ages increased. There might be water competition at the mature age of *Populus euphratica* and seedling age of *Tamarix ramosissima*. Whether seedling or mature, *Tamarix ramosissima* could use deeper water than *Populus euphratica*, and therefore, be more adaptable to the arid environment.

Keywords: *Populus euphratica*; *Tamarix ramosissima*; different ages of vegetation; water use strategies; stable isotope

水是限制干旱荒漠植物生长的关键因子^[1]。植物水分来源的选择取决于生境中有效水分的分布及植物获取水分的能力^[2]。全根系挖掘法是研究植物水分来源的传统方法, 根据植物根系的分布特征粗略判断植物吸水深度, 具有破坏性, 且耗时耗力、准确性

较差^[3]。近年来, 国内外许多学者开始利用稳定同位素技术研究植物水分的来源及其吸收土壤水分层位的变化规律^[4-5], 探讨不同植物的水分利用策略^[6]。除盐生植物和超旱生植物外, 植物根系吸水通过木质部传输至叶片或未栓化的枝条之前一般不存在

$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 稳定同位素的分馏过程^[7], 通过比较植物木质部水与各潜在水源的氢氧同位素值可以判断植物根系吸收水分的有效区域, 确定植物水分的来源^[8]。基于稳定同位素分割假说, 有学者提出植物蒸腾水和地下水、地表径流受到土壤中的不同水源库补给^[9], 这对传统陆面模型认为的不同水源均来源于单一混合土壤水源库的观点提出了挑战^[10], 对于探明流域生态水文界面过程的水力联系和土壤水的来源及供水机制具有重要意义。

胡杨 (*Populus euphratica*) 和柽柳 (*Tamarix ramosissima*) 是典型的干旱荒漠优势植物, 其对极端环境的适应性以及水分利用策略始终是国内外学者关注的热点^[11-13]。研究结果表明胡杨和柽柳的分布状况^[14]、生长季节^[15]、地下水埋深^[16]以及距河道远近^[17]不同, 水分利用来源存在一定差异。此外, 林龄也是胡杨和柽柳水分来源的重要影响因素, 不同林龄的胡杨和柽柳的需水特征与耗水机制明显不同^[18-19]。但目前有关林龄对胡杨和柽柳水分来源以及水分利用机制的研究较少, 基于水文分割假说的研究更少。本文在前人研究基础上, 对塔里木河流域不同林龄胡杨和柽柳的不同潜在水源(土壤水和地下水)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化进行了研究, 探讨其水分来源及对干旱环境的适应机制, 从而为干旱区生态水文学理论研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择塔里木河干流河岸优势植物种胡杨和柽柳作为研究对象, 以新疆阿克苏国家水平衡试验站人工林区($40^{\circ}37'N, 80^{\circ}45'E$)作为控制试验区。该区域属于暖温带干旱性气候, 年平均气温 11.2°C , 多年平均降水量为 45.7 mm , 年水面蒸发量为 2500 mm , 无霜期为 207 d , 全年日照时数达 2940 h , 年均太阳辐射量为 6000 MJ/m^2 ^[20]。样地土壤类型为沙质潮土, 质地以粉砂壤土为主, 土壤容重为 1.35 g/cm^3 , 田间持水量为 $0.267\sim0.347\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 饱和含水量为 $0.43\sim0.50\text{ m}^3/\text{m}^3$, 地下水埋深在 $2.5\sim4\text{ m}$ 之间。该区河岸植被具有明显的乔、灌、草结构, 主要分布有胡杨、柽柳、芦苇 (*Phragmites australis*)、铃铛刺 (*Halimodendron halodendron*)、罗布麻 (*Apocynum venetum*) 等物种, 胡杨和柽柳为优势种。

1.2 样品采集与测定

植物样采集: 于 2016 年 8 月 31 日在试验区内选取不同林龄胡杨、柽柳标准木各 3 株^[21-22], 生长特征见表 1。每株植物取一组植物样品, 共 3 个重复。剪取非绿色栓化小枝(直径 $0.3\sim0.5\text{ cm}$; 长 $3\sim5\text{ cm}$), 去除枝条外皮和韧皮部, 装入采样瓶用 Parafilm 封口膜密封, 立即放入携带的冰盒中(-4°C)冷藏保存。

表 1 不同林龄胡杨和柽柳基本特征

指标	胡杨幼苗	成熟胡杨	柽柳幼苗	成熟柽柳
树高/m	1.5	10.2	1.6	3.1
胸径/cm	3.4	22.4	1.8	5.7
林龄/a	2~3	15~20	2~3	15~20

土壤样品采集: 在胡杨、柽柳标准木冠层下, 采集 $0\sim300\text{ cm}$ 土样, 3 个重复。 $0\sim40\text{ cm}$ 每隔 10 cm 一层; $40\sim200\text{ cm}$ 每隔 20 cm 一层; $200\sim300\text{ cm}$ 每隔 50 cm 一层, 样品装袋后立即放入冰盒保存。不同土层的土壤体积含水量运用 CNC503B 型中子仪进行测定。

地下水样品取自阿克苏站地下观测井, 地下水埋深为 $3.12\sim3.68\text{ m}$ (8 月)。所有样品采集后带回实验室, 植物样品和土壤样品冷冻(-20°C)保存, 水样冷藏保存(4°C)。

大气降水样品于 2016 年 8 月 17 日、20 日和 25 日采集自阿克苏水平衡试验站降水观测场, 降水收集后, 立即装入聚乙烯采样瓶中冷藏保存。引用周天河测得的 23 组当地大气降水 D 和 ^{18}O 同位素数据^[17], 计算当地大气降水线(LMWL)。

样品提取及测定: 土壤和植物样品利用低温真空抽提系统进行提取, 用液态水同位素分析仪 (Picarro L2130-i) 测定氢氧稳定同位素比率(δ_x)。计算方法为:

$$\delta_x = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标样}}) - 1] \times 10^3$$

式中: $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标样}}$ 分别为样品和标样的 D 和 ^{18}O 同位素丰度比值; δ_x 为同位素比值相对标准同位素比值的千分差。Picarro L2130-i 氢和氧的分析误差分别小于($\pm 2\%$)和($\pm 1\%$)。

1.3 水文分割方法

通过量化植物水、土壤水和地下水同位素特征值与当地大气降水线(LMWL)之间的偏离程度, 确定大气降水补给各水源过程中是否发生生态水分分离现象。量化方法为^[10]:

$$\text{降水偏离} = [\delta^2\text{H} - a\delta^{18}\text{O} - b]/S$$

式中: a 、 b 分别为当地大气降水线的斜率和纵截距; S 为 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 标准差测定的不确定性。

1.4 水分来源确定方法

由于旱生植物在根系输水过程中依赖于共质体输水途径导致 δD 同位素发生分馏^[7], 因而在确定干旱区植物水分来源时多使用 ^{18}O 值, 具体方法为:

(1) 采用直接观察法, 对比木质部水与不同潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值来初步判断植物水分利用来源, 植物木质部水与土壤水或地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值有交叉或相近时, 则认为植物利用了该水源^[8]。

(2) 利用平均吸水深度模型确定植物吸收土壤水分的平均深度验证直观法结果。

$$n_i = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-(Y-\mu)^2/2\sigma^2} \delta^{18}\text{O}_{\text{plant}} (\%) = \sum_{i=1}^m (n_i \times \delta^{18}\text{O}_i)$$

式中: n_i 为深度为Y土壤水的利用比例; μ 为植物的平均吸水深度(cm); $\delta^{18}\text{O}_{\text{plant}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_i$ 分别为计算的植物茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和*i*层土壤水的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值。标准差 σ 设定为8.33 cm。通过MATLAB软件计算不同层位的植物水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{plant}}$ 值,当其与实测的植物茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相等时,对应的土壤深度即为植物利用水分的平均土壤深度^[23]。

(3)不同潜在水源对植物水分利用贡献的比例采用多水源混合模型(IsoSource模型)进行定量估算^[24]。该模型基于同位素质量平衡原理,计算公式为:

$$\delta X_p = \sum_{i=1}^n f_i \delta X_i$$

式中: δX_p 和 δX_i 分别为植物木质部水和潜在水源*i*的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值, f_i 为潜在水源*i*在植物所利用的水分总量中的贡献比例,各潜在水源贡献比例之和为1。运行模型前需设定两个参数,增量来源设定为1,即赋值增量的步长值为1%;质量平衡公差为0.01%,表示符合条件的比例组合可以接受的范围。

1.5 数据统计分析

采用SPSS 19.0软件对数据进行相关性分析和显著性检验,利用Origin 9.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 大气降水与植物水及其潜在水源的同位素特征关系

通过回归分析得到当地大气降水线方程(LMWL): $\delta D=6.88\delta^{18}\text{O}+4.86(n=26, R^2=0.94)$ 。与全球大气降水线方程(GMWL: $\delta D=8\delta^{18}\text{O}+10$)相比,当地大气降水线斜率较小,表明大气降水在降落过程中受蒸发作用影响发生了同位素非平衡分馏。为量化蒸发过程中非平衡分馏的程度,Dansgaard提出了氘盈余参数: $d=\delta D-8\delta^{18}\text{O}$ ^[25]。通过计算,研究区大气降水的氘盈余变化范围为-15.23‰~24.22‰,均值为8.25‰,氘盈余变化范围较大说明大气降水水汽来源区湿度和蒸发非平衡分馏程度变化大。

对胡杨和柽柳的茎干水及其潜在水源与当地大气降水线进行比较,结果表明,0~30 cm土壤表层受到强烈的蒸发影响,分馏明显,土壤水同位素特征值明显偏离当地大气降水线。30 cm以下土层随着土壤深度的增加,偏离大气降水线的程度减小(图1)。地下水同位素特征值与当地大气降水线基本一致,表明降水可能是地下水的潜在补给源。植物水同位素特征值位于大气降水线右侧,表明植物利用了受到蒸发影响发生同位素分馏的土壤水。胡杨和柽柳成熟木木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 均显著低于幼苗($P<0.05$),相同林龄阶段,胡杨木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于柽柳(表2)。

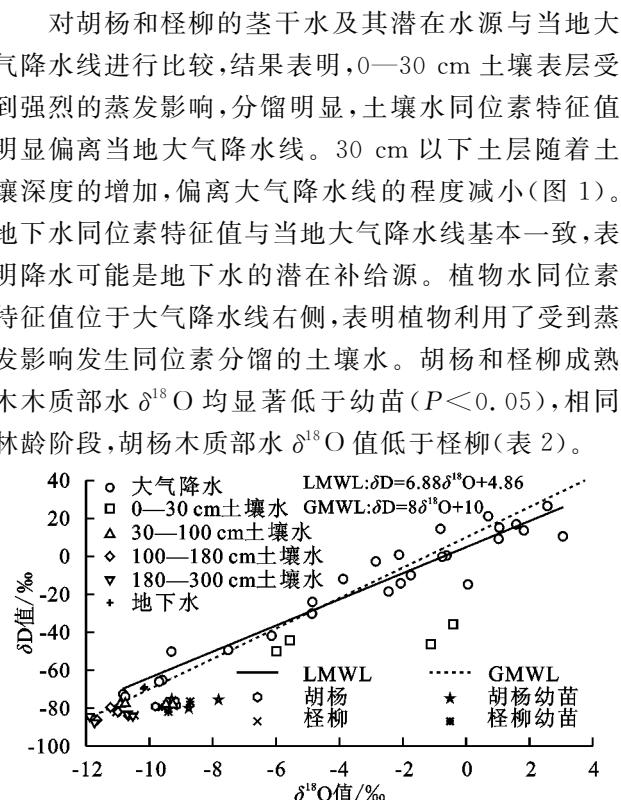


图1 植物水及其潜在水源与大气降水同位素特征值的关系

由表2可知,植物水、土壤水和地下水的降水偏离均为负数,且植物水和土壤水的降水偏离值与地下水存在显著差异,这表明植物水与地下水由不同的土壤水源库补给,水源补给过程中发生了生态水文分离。即土壤中存在两个不均一、不完全混合的水源库,分别维持植物需水耗水和地下水补给。

表2 植物水、土壤水和地下水的同位素特征值和降水偏离

林龄	植物水			土壤水			地下水		
	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	降水偏离	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	降水偏离	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	降水偏离
胡杨幼苗	-75.49b	-8.62c		-73.90ab	-9.87a				
成熟胡杨	-77.98ab	-9.38ab	-8.57a	-73.70ab	-8.22b	-6.88a	-69.25	-10.16	-1.89b
柽柳幼苗	-73.95b	-8.90bc		-71.51b	-9.01ab				
成熟柽柳	-81.30ac	-10.32a		-75.77a	-9.59a				

2.2 不同林龄胡杨和柽柳的土壤含水量变化特征

研究表明土壤含水量随土壤深度增加而增加(图2)。0~40 cm土层受蒸发的强烈影响,且土壤空隙较大,持水性差,土壤含水量存在显著的垂直变化,变化范围为17.72%~33.08%;40~160 cm土层土壤含水量变化幅度相对较小,而160~300 cm土层可能受到浅层地下水影响,土壤含水量大且不存在显著变化。不同林龄胡杨和柽柳样地间土壤含水量差异不显著($P>0.05$),柽柳样地土壤含水量略高于胡杨样

地,幼苗样地高于成熟木样地,这是由于不同林龄植物的需水量和耗水量不同所致。

2.3 不同林龄胡杨木质部水与其他水源 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征

同位素分析表明,不同林龄胡杨土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 均随土壤深度增加呈现下降趋势(图3A,图3B),最大值出现在0~10 cm的表层土壤。对于胡杨幼苗,0~40 cm土层 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化剧烈,表明该土层受到强烈的蒸发作用,而成熟胡杨受蒸发影响强烈的土层达到

80 cm, 80 cm 以下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值总体变化不明显。不同林龄胡杨冠下 250—300 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ (胡杨幼苗: $-10.35\text{\textperthousand}$; 成熟胡杨: $-10.48\text{\textperthousand}$) 均接近地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($-10.23\text{\textperthousand}$), 表明该土层土壤水可能受到地下水补给。胡杨幼苗与成熟木土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征存在显著差异 ($P < 0.05$)。

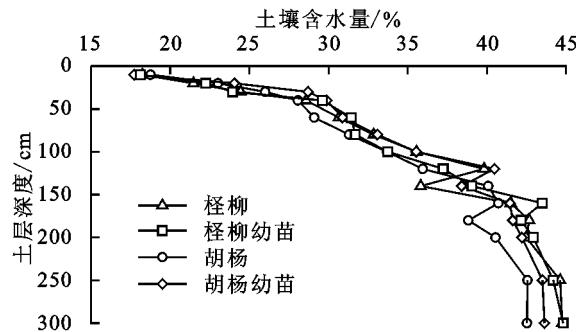


图 2 不同林龄胡杨和柽柳样地土壤含水量变化特征

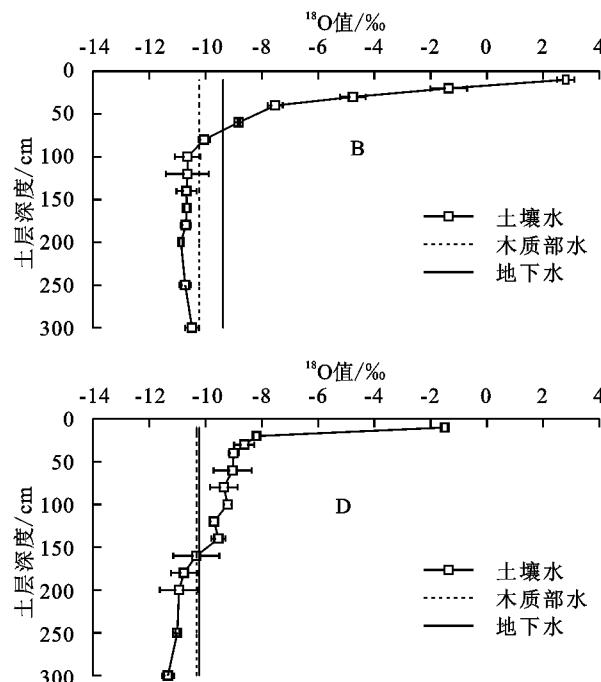
由图 3A 可知, 胡杨幼苗木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-8.62\text{\textperthousand}$, 显著高于成熟胡杨 ($-9.38\text{\textperthousand}$) ($P < 0.05$)。胡杨幼苗木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与冠下 30—40 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 相交, 表明 30—40 cm 土壤水可能是胡杨幼苗的潜在水源。而成熟胡杨以 60—80 cm 土壤水作为主要的水分来源 (图 3B)。通过木质部水与不同潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比发现, 胡杨幼苗和成熟木的水分利用来源存在一定差异, 随林龄增长胡杨的吸水层位加深。根据平均吸水深度模型计算得出, 胡

杨幼苗的平均吸水深度为 33.77 cm, 而成熟胡杨吸水深度为 65.71 cm, 这一结果与直观法范围一致。

2.4 不同林龄柽柳土壤水和木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 变化及其水分来源比较

研究表明柽柳幼苗和成熟柽柳土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均随土壤深度增加而减少 (图 3C, 图 3D)。不同林龄柽柳冠下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在显著差异 ($P < 0.05$), 柽柳幼苗土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较大 ($0.80\text{\textperthousand}$ ~ $-11.99\text{\textperthousand}$), 0—80 cm 柽柳幼苗冠下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动剧烈。而对于成熟柽柳, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围小 ($-1.50\text{\textperthousand}$ ~ $-11.33\text{\textperthousand}$)。除表层土壤外, 柽柳幼苗土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值整体低于成熟柽柳。

柽柳幼苗与成熟柽柳木质部水同位素值存在显著差异 ($P < 0.05$), 成熟木木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($-10.32\text{\textperthousand}$) 显著低于幼苗木质部 ($-8.90\text{\textperthousand}$)。由图 3C 和图 3D 可知, 柽柳幼苗木质部水与 40—60 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交, 这表明柽柳幼苗可能利用 40—60 cm 范围的土壤水作为水分来源。成熟柽柳的水分利用策略与柽柳幼苗明显不同, 其木质部水的同位素值与地下水以及 160—300 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近, 表明成熟柽柳主要利用地下水和深层土壤水作为水分来源。平均吸水深度模型计算发现, 柽柳幼苗的平均吸水深度分别为 46.54 cm, 成熟柽柳为 161.53 cm, 这与直观法结果一致 (图 3), 表明成熟柽柳较幼苗能够利用更深层的土壤水和地下水。



注: A 为胡杨幼苗; B 为成熟胡杨; C 为柽柳幼苗; D 为成熟柽柳

图 3 不同林龄胡杨和柽柳的水分来源

2.5 不同林龄胡杨和柽柳潜在水源利用比例

利用 Iso-Source 模型对不同林龄胡杨和柽柳潜在水源的利用比例进行估算 (图 4), 结果表明, 胡杨

幼苗的水分利用来源较为单一, 对 0—60 cm 土壤水利用率达到 53.4%, 而对其他土层水分利用率较低 (表 3)。成熟胡杨则对 30—100 cm 土壤水和地下水

利用比例最大(47.3%),各层土壤水利用比例差异较小,且对深层土壤水和地下水利用比例高于胡杨幼苗,表明成熟胡杨较胡杨幼苗吸水范围更大,能够利用更深层土壤水分。柽柳幼苗对30—100 cm土壤水和地下水利用比例最大,利用比例为48.9%,各水源间利用比例差异较小,吸水范围较大,且与成熟胡杨的主要水分来源相同,表明二者可能存在水分竞争关系。而成熟柽柳则主要利用160 cm以下深层土壤水和地下水,利用比率达到61.9%。这些结果表明,无论在幼苗阶段或成熟阶段,柽柳对土壤水的利用层位均低于胡杨,利用更深层水源的能力更强。不同林龄胡杨和柽柳的吸水深度为成熟柽柳>成熟胡杨>柽柳幼苗>胡杨幼苗。

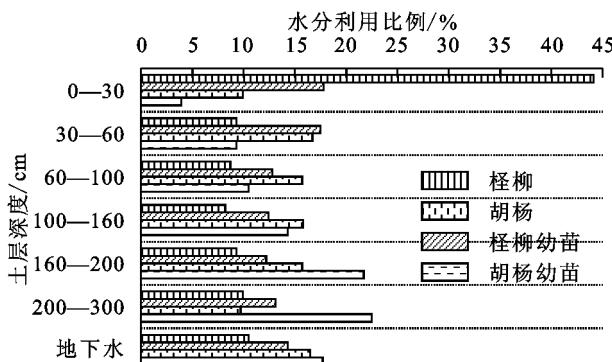


图4 不同林龄胡杨和柽柳潜在水源利用比例

表3 不同林龄胡杨和柽柳的主要水分利用来源比例和平均吸水深度

林龄	主要水分来源	利用比例/%	平均吸水深度/cm
胡杨幼苗	0—60 cm 土壤水	53.4	33.77
柽柳幼苗	30—100 cm 土壤水、地下水	48.9	46.54
成熟胡杨	30—100 cm 土壤水、地下水	47.3	65.71
成熟柽柳	160—300 cm 土壤水、地下水	61.9	161.53

3 讨论

当前陆地地表模型认为,降水事件发生后,土壤水受降水入渗补给混合形成新的土壤水,取代原有土壤水并将其逐渐向下推移最终补给径流^[10],地下水、地表径流和植物耗水均来自于这一混合土壤水源库。然而,Brooks等和GoldSmith等^[26-27]对地中海气候区和季节性热带干旱山地林区的生态水文过程进行了研究,发现土壤中提供植物用水的水源与补给地下水和河流水的水源不同,土壤中的非饱和水并未参与补给地下水。Evaristo等^[28]对不同干湿条件下的热带生态系统的生态水文过程进行了研究得出了相似的结论,并对全球47个样点不同水体的氢氧同位素特征值进行整合研究,结果表明生态水文分离现象在全球尺度范围内广泛存在,植物水来自于非饱和土壤水而地下水和河流水补给来自于土壤水中的流动库^[10]。本文对塔里木河流域当地大气降水线与植物水及其潜在水源的氢氧

同位素特征值进行对比,发现植物水与土壤水的降水偏离值接近,氢氧稳定同位素特征值明显偏离当地大气降水线,而地下水则与当地大气降水线基本一致,降水偏离值与植物水和土壤水存在显著差异,这一结果表明研究区植物需水耗水和地下水补给来自于土壤中不均一、不完全混合的水源库。

不同林龄和大小的植物所处的地表、地下以及微生物环境存在差异,水分利用模式也会发生变化^[19]。本文研究发现,胡杨幼苗主要利用0—60 cm土壤水,利用比例达到53.4%,平均吸水深度为33.77 cm。这与前人^[29]得出胡杨幼苗主要利用浅层土壤水,平均吸水深度为37 cm的研究结果一致。与胡杨幼苗相比,成熟胡杨能够利用更深层位的水源。相关研究表明,荒漠河岸成熟胡杨的水分主要来源于深层土壤水和地下水^[16,29],而绿洲区由于土壤水分状况良好,胡杨主要利用60 cm左右范围土壤水,水源层位较浅^[30]。地下水埋深也是影响植物吸水层位的重要因素,周天河等对塔里木河河道不同距离的胡杨水分来源进行了研究,发现临近河道的浅地下水埋深区(2—3.5 m)胡杨主要利用浅层土壤水和地下水^[17]。本文中塔里木河上游绿洲区采样当月降水量达到了37.6 mm,且受绿洲农田引水灌溉、生活需水等人类活动影响,地下水埋深较浅(3.12~3.68 m),土壤含水量范围为17.72%~43.63%,使得成熟胡杨主要利用30—100 cm土壤水和地下水,平均吸水深度为65.71 cm。根系生长与水分吸收联系紧密,是影响植物吸水的主要器官^[31]。李建林等^[32]研究认为,胡杨吸水根集中在0—80 cm,占总根系的97.6%,这导致胡杨根系吸取该范围土壤水的能力强。

不同林龄柽柳水分利用策略存在明显差异。幼苗主要利用30—100 cm土壤水,平均吸水深度为46.54 cm,这一结果与朱林等^[33]对宁夏平原3年生柽柳进行的研究结果一致,浅层土壤水是柽柳幼苗的主要水分来源。成熟柽柳则主要利用深层土壤水和地下水作为水分来源,利用比例达到61.9%。相关学者在不同地区研究得出了相似结论,仅对不同水源的利用比例存在一定差异。周海等^[34]、赵良菊等^[14]和龙翔等^[15]对准噶尔盆地南缘及黑河流域多枝柽柳研究发现,其90%的水分来源于深层土壤水和地下水,水分来源稳定,不受土壤水分状况影响。柽柳是典型的深根荒漠植被,占根系表面积70%的吸收根分布在200—300 cm的土层中^[34]。本文中观测地下水位与柽柳吸收根分布范围接近,使得成熟柽柳主要利用深层土壤水和地下水作为水分来源。

由植物木质部水和地下水、不同深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比,胡杨和柽柳水分利用策略存在差异。在干旱地区,胡杨和柽柳水分来源不同导致二者对干旱环境的适应能力和分布状况发生很大差异。研究表明,胡杨对地下水埋深变化敏感,净光合速率受地下水状况影响较大,而柽柳对地下水埋深变化不敏感,对不同水分状况适应性更强^[35]。柽柳可以吸收饱和区和非饱和区土壤水,这种利用双重水源的能力使其在地下水位多变的生境中及在与其他植物种的生存竞争中占优势^[36]。本文结果表明,无论在幼苗阶段或成熟阶段,柽柳水分利用层位均低于胡杨,利用更深层水源的能力更强。尤其在成熟阶段,柽柳能够利用深层土壤水和地下水作为稳定水分来源,而胡杨对各层水分利用差异较小,这说明柽柳受水分状况影响较小,对干旱环境的适应性更强。

4 结论

(1)研究区植物水和土壤水的降水偏离值分别为-8.57和-6.88,与地下水的降水偏离程度(-1.89)存在显著差异($P<0.05$),表明大气降水补给各水源过程中会发生生态水分分离现象,土壤中存在不均匀、不完全混合的水源库分别维持植物需水耗水和地下水补给。

(2)不同林龄胡杨和柽柳的土壤水同位素值均随土壤深度增加呈现出下降趋势,受蒸发作用影响,表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化剧烈。

(3)不同林龄胡杨和柽柳水分利用来源存在差异,吸水层位随林龄增加而加深。胡杨幼苗和成熟木主要利用0—60 cm 浅层土壤水,利用比例达到53.4%,平均吸水深度为33.77 cm;成熟胡杨和柽柳幼苗可能存在水分竞争关系,二者主要水分来源均为30—100 cm 土壤水和地下水,具体利用比例略有差异,平均吸水深度分别为65.71 cm 和 46.54 cm;成熟柽柳则主要利用深层土壤水和地下水,利用比例达到61.9%。无论在幼苗阶段或成熟阶段,柽柳水分利用层位均低于胡杨,对干旱环境的适应性更强。

参考文献:

- [1] Dube O P, Pickup G. Effects of rainfall variability and communal and semi-commercial grazing on land cover in southern African rangelands [J]. Climate Research, 2001, 17(2): 195-208.
- [2] 邓文平,余新晓,贾国栋,等.利用稳定氢氧同位素定量区分栓皮栎旱季水分来源的方法比较[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(3):412-422.
- [3] 张建锋,周金星.林木根系衰老研究方法与机制[J].生
态环境学报,2006,15(2):405-410.
- [4] 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[J].生态学报,2011,31(24):7533-7541.
- [5] 戴岳,郑新军,唐立松,等.古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J].植物生态学报,2014,38(11):1214-1225.
- [6] 邢星,陈辉,朱建佳,等.柴达木盆地诺木洪地区5种优势荒漠植物水分来源[J].生态学报,2014,34(21):6277-6286.
- [7] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1/2): 93-107.
- [8] Duan D. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in analyzing plant water use sources[J]. Ecology & Environment, 2007, 16(2): 655-660.
- [9] McDonnell J J. The two water world hypothesis: Eco-hydrological separation of water between streams and trees? [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Water, 2014, 1(4): 323-329.
- [10] Evaristo J, Jasechko S, McDonnell J J. Global separation of plant transpiration from groundwater and streamflow[J]. Nature, 2015, 525(7567): 91-94.
- [11] 张付新.试论塔里木河流域植被变化与环境变迁的互动关系[J].塔里木大学学报,2008,20(4):55-60.
- [12] Gries D, Zeng F, Foetzki A, et al. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima*, and *Populus euphratica*, on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table[J]. Plant Cell and Environment, 2003, 26(5): 725-736.
- [13] Si J, Feng Q, Cao S, et al. Water use sources of desert riparian *Populus euphratica* forests [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186 (9): 5469-5477.
- [14] 赵良菊,肖洪浪,程国栋,等.黑河下游河岸林植物水分来源初步研究[J].地球学报,2008,29(6):709-718.
- [15] 龙翔,孙自永,周爱国,等.黑河中游河岸带柽柳水分来源的 ^{18}O 同位素示踪研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):150-155.
- [16] 周天河,赵成义,俞永祥,等.基于稳定氢氧同位素的胡杨与柽柳幼苗水分来源研究[J].水土保持学报,2015, 29(4):241-246.
- [17] 周天河,赵成义,吴桂林,等.塔里木河上游胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)水分来源的稳定同位素示踪[J].中国沙漠,2017,37(1):124-131.
- [18] Song L, Zhu J, Li M, et al. Water use patterns of *Pinus sylvestris*, var. *mongolica*, trees of different ages in a semi-arid sandy lands of Northeast China[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 129(9): 94-107.
- [19] Kerhoulas L P, Kolb T E, Koch G W. Tree size, stand density, and the source of water used across sea-

- sons by ponderosa pine in northern Arizona[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289(2): 425-433.
- [20] 赵成义, 施枫芝, 盛钰, 等. 近30年阿克苏绿洲水面蒸发趋势及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 237-240.
- [21] 王金山, 哈力克·玉米提, Bernd C, 等. 塔里木河下游胡杨林胸径结构及林木分布特征[J]. *植物学报*, 2008, 25(6): 728-733.
- [22] 李尝君, 郭京衡, 曾凡江, 等. 多枝柽柳(*Tamariixramossissima*)根、冠构型的年龄差异及其适应意义[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 365-372.
- [23] Romero-Saltos H, Sternberg L S, Moreira M Z, et al. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake[J]. *American Journal of Botany*, 2005, 92(3): 443-455.
- [24] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [25] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [26] Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, et al. Eco-hydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 100-104.
- [27] Goldsmith G R, Muñoz-Villers L E, Holwerda F, et al. Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(6): 779-790.
- [28] Evaristo J, McDonnell J J, Scholl M A, et al. Insights into plant water uptake from xylem-water isotope measurements in two tropical catchments with contrasting moisture conditions[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(18): 3210-3227.
- [29] 刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 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[J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 729-739.
- [30] 曾巧, 马剑英. 黑河流域不同生境植物水分来源及环境指示意义[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 148-155.
- [31] 单立山, 张希明, 魏疆, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地两种灌木有效根系密度分布规律的研究[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(3): 400-405.
- [32] 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[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(1): 97-101.
- [33] 朱林, 许兴, 毛桂莲. 宁夏平原北部地下水埋深浅地区不同灌木的水分来源[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(7): 618-628.
- [34] 周海, 郑新军, 唐立松, 等. 准噶尔盆地东南缘多枝柽柳、白刺和红砂水分来源的异同[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(7): 665-673.
- [35] 吴桂林, 蒋少伟, 周天河, 等. 不同地下水埋深胡杨与柽柳幼苗的水分利用策略比较[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(6): 1209-1216.
- [36] 曾凡江, 张希明, 李小明. 柽柳的水分生理特性研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 611-614.

(上接第65页)

- [12] 隋媛媛, 刘明义, 许晓鸿, 等. 坡式条田在黑土区坡耕地水土流失治理中的应用及效益分析[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 52-55.
- [13] 温磊磊, 郑粉莉, 杨青森, 等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(9): 1084-1091.
- [14] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 178-185.
- [15] Zheng J Y, Kang S S, Che W W, et al. Development and uncertainty analysis of a high-resolution NH_3 emissions inventory and its implications with precipitation over the Pearl River Delta region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(15): 7041-7058.
- [16] 王淑平, 周广胜, 孙长占, 等. 土壤微生物量氮的动态及其生物有效性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 87-90.
- [17] 马波, 马璠, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 136-146.
- [18] Quinn N W, Laflen J M. Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1983, 26(5): 1445-1450.
- [19] 孙志高, 刘景双, 王金达. 三江平原典型湿地系统大气湿沉降中氮素动态及其生态效应[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 182-192.
- [20] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 41-45.
- [21] 孙继梅, 吴景贵, 李建明, 等. 不同有机肥对黑土氮素时空分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 75-81.