

塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源

王玉阳^{1,2}, 陈亚鹏¹, 李卫红¹, 王日照^{1,2}, 周莹莹^{1,3}, 张建鹏^{2,4}

(1. 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, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 4. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对塔里木河下游典型荒漠植物河岸胡杨(*Populus euphratica*, 成年和幼龄)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)、甘草(*Glycyrrhiza inflata*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)木质部水及不同潜在水源的稳定性氧同位素值的测定, 并利用多源性混合模型(IsoSource)和相似性比例指数(PS指数)分别分析了各潜在水源对不同植物的贡献率以及各月份不同植物间的水分利用关系。结果表明: (1)在塔里木河下游, 成年胡杨、幼龄胡杨、柽柳几乎都不利用0~50 cm的表层土壤水, 而主要利用200 cm以下的深层土壤水和地下水, 而甘草、骆驼刺主要吸收50~200 cm的土壤水。(2)在生长季的不同月份里, 除个别月份外, 胡杨(成年和幼龄)、柽柳之间存在激烈水分竞争; 甘草、骆驼刺在生长旺季和末期对各水源都存在较强的竞争关系, 而成年或幼龄胡杨、柽柳和甘草、骆驼刺之间水分竞争关系较弱。(3)在塔里木河下游, 为了适应极端干旱, 无论是乔木胡杨、还是灌木柽柳, 水分来源主要是较稳定的深层水源, 且对各水源的利用比例在不同月份波动不大。

关键词: 塔里木河; 荒漠植物; 水分来源; 稳定性同位素

文章编号: 1000-694X(2017)06-1150-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00103

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

0 引言

水是干旱区最重要的生态限制因子, 水分来源的选择是植物生命周期中最重要的选择过程^[1]。在研究植物水分来源的诸多方法中, 稳定性氢、氧同位素的技术被认为是精确度较高、破坏性低且最高效的一种方法^[2-3]。除极少数泌盐植物外, 植物根系吸收的水分在达到叶片或者未栓化的嫩枝之前不会发生同位素分馏^[4]。因此, 通过对比植物木质部水与各潜在水源的稳定性氢氧同位素组成, 就能够分析出植物的水分来源情况^[5]。

自20世纪80年代以来, 国外学者就开始将氢、氧同位素技术应用在河岸、荒漠、森林及海岸等群落植物水分来源和植物水分利用关系的研究上^[6-9]。近年来, 国内学者已将稳定同位素技术应用到热带季节性湿润林区、喀斯特地区和高山、亚高山等地区植物的水分来源的研究^[10-14], 并已取得了许多重要成果, 而对于干旱区生态系统植物水分来源的研究较少, 且主要集中在黑河流域^[5, 15-16]。上述研究结

果表明植物的水分来源因植物种类、生长季和气候、土壤等生境的不同而会有所差异。

荒漠河岸带植被是干旱区一类重要的生态系统, 对于维系干旱区生态系统稳定、防治沙漠化具有重要意义^[17]。近几十年来, 塔里木河下游的生态系统因人为对自然水资源时空格局的改变而受到严重影响, 以胡杨林为主体的荒漠河岸植物全面衰败^[18]。众多学者对塔里木河荒漠河岸植物个体的生理生态特征^[19]、群落特征^[20]、生态过程^[21]等方面进行了大量的研究, 然而对于塔里木河下游荒漠河岸林植物水分来源和植物间水分关系的研究却少见报道。因此本文以塔里木河下游的典型植物种乔木——胡杨(*Populus euphratica*, 成年和幼龄)、灌木——柽柳(*Tamarix ramosissima*)、草本——胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)和疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)为对象, 利用稳定性氧同位素技术分析植物在生长季初期(5月)、旺季(7、8)和末期(9月)的水分来源情况, 旨在了解荒漠河岸植物的水分利用特征和植物种间水分利用关系, 为极端干旱区植被的保护和恢复提供科学依据。

收稿日期: 2016-06-06; 改回日期: 2016-11-08

资助项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAC15B02); 国家自然科学基金项目(41371515, 41371503)

作者简介: 王玉阳(1991—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事干旱区植物生理生态研究。E-mail: wangyuyang14@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 陈亚鹏(E-mail: chenyp@ms.xjb.ac.cn)

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆塔里木河下游的库姆塔格,距新疆生产建设兵团34团铁干里克镇25 km。该区域地处塔克拉玛干沙漠和库姆克沙漠之间,属于典型的大陆性暖温带极端干旱气候,日照充足、蒸发强烈、风沙多、降水少。铁干里克气象站1957—2012年数据显示,该区域多年平均气温为10.5~11.4℃,平均风速1.6~2.9 m·s⁻¹,年降雨量为17~42 mm,年蒸发量达到2 967 mm。土壤基质以细粒沙漠土为主,含盐量高。植物种类以杨柳科、柽柳科、禾本科等植物为主,构成了乔、灌、草植物群落。乔木主要是胡杨,灌木主要是多枝柽柳、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等,草本主要有甘草、芦苇(*Phragmites communis*)、疏叶骆驼刺等^[22]。

1.2 样品采集与数据分析

1.2.1 样品采集

在塔里木河下游的库姆塔格选择具有代表性的样地,分别于2015年5、7、8、9月对样地内的植物和土壤、地下水样品各采集一次。采样的植物为本区4个优势种:胡杨(成年胡杨胸径(29.0±2.3)cm,树高(950±50)cm;幼龄胡杨胸径(5.5±1.5)cm,树高(225±25)cm)、多枝柽柳、胀果甘草和疏叶骆驼刺。每种植物分别选取3~4株植株采样,每株3个样品。其中胡杨和柽柳采集非绿色的栓化小枝,甘草和骆驼刺挖取主根,迅速剥离植物外皮后装入采样瓶中,并用parafilm膜封口,放入冰盒,带回实验室。

土壤样品利用人工土钻采集,采样间隔为0~50 cm每10 cm为1层,50 cm以下土层每50 cm一层,直至饱和含水层。每层土壤样品分别采集2份,一份装入铝盒用于土壤含水量的测定;一份装入采样瓶,用于土壤水同位素的测定。每份每层土壤样品分别各取3个重复。

地下水取样来自样地附近的监测水井。所有用于同位素测定的样品装入采样瓶后立即用parafilm膜密封保存,其中植物和土壤的样品在进行水分抽提前冷冻保存(低于-20℃)。地下水样品冷藏保存(约-4℃)。

1.2.2 样品处理与分析

土壤和植物木质部的水分在荒漠与绿洲生态国

家重点实验室采用低温真空抽提法抽取,所有水样的稳定性氧同位素比率利用LGR液态水同位素分析仪测定。由于在一些旱生植物的水分吸收过程中存在着氢同位素的分馏^[23],因而本研究采用稳定性氧同位素进行分析。环境稳定同位素¹⁸O的含量通常用δ¹⁸O值表示,该值表示样品中¹⁸O含量相对于国际标准水样VSMOW(Vienna Standard Mean Water)中¹⁸O含量的千分差^[24]:

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

式中: R_{sample} 和 R_{standard} 分别为样品和国际通用标准物中氧元素的重轻同位素丰度之比。精确度¹⁸O/¹⁶O优于0.1‰,δ¹⁸O值的测试误差不超过0.2‰。

土壤含水量的测定采用烘干称重法测定。将铝盒中土壤样品放入烘箱中105℃恒温烘干24 h至恒重,然后测定烘干土样质量,土壤质量含水量可表示为:

$$\text{土壤含水量} = (\text{烘干前铝盒及土样质量} - \text{烘干后铝盒及土样质量}) / (\text{烘干后铝盒及土样质量} - \text{烘干空铝盒质量}) \times 100\%$$

1.2.3 水源的分类

由于研究区位于极端干旱区,土壤深度达到650 cm左右处才达到水分饱和层,若将取样时的每层土壤水都作为植物的水源,不仅难以计算,而且难以确定植物吸水的大致深度。因此,需根据各月不同深度处土壤水δ¹⁸O值的相似性及变化趋势对土壤剖面进行分层,将分层后的土壤水以及地下水作为植物的潜在水源,然后计算分层后各潜在水源对植物的贡献率^[25]。本研究将潜在水源划分为4类:(1)浅层土壤水(0~50 cm)δ¹⁸O值变化最剧烈,这与土壤浅层受到的强烈蒸发有关。(2)中层土壤水(50~200 cm)δ¹⁸O值仍有较大波动,但与表层相比这种趋势已经趋缓。(3)深层土壤水(200 cm至饱和含水层)具有相对一致的δ¹⁸O值,各月份之间相比变化也不大。(4)地下水。

土壤分层合并加权处理δ¹⁸O值的公式如下所示^[26]:

$$\delta_{\text{WT}} = \frac{\sum_{i=1}^n (swc_x \times \delta_x)}{\sum_{i=1}^n swc_x} \quad (2)$$

式中:δ_{WT}是土壤层合并后加权处理的土壤水δ¹⁸O值;swc_x和δ_x分别是土壤深度x处的土壤含水量与土壤水δ¹⁸O值。

1.2.4 PS 指数

相似性比例指数(PS指数)是表征生物之间生

态位重叠的指标^[27-28]。PS 指数越大表明两物种生态位重叠越显著,对某一资源竞争越激烈;PS 指数越小表明两物种生态位重叠不显著,对某一资源竞争较小。本文利用 PS 指数来评估任意两个物种间水分的利用情况。

$$PS = 1 - 0.5 \sum_{i=1}^n |p_{1i} - p_{2i}| \quad (3)$$

式中: p_{1i} 和 p_{2i} 分别表示相比较的任意两个物种对第 i 种水源的利用比例。

1.2.5 数据分析

不同潜在水源对植物的贡献率采用多源线性混合模型 IsoSource 计算^[29],该模型用于计算多种水分来源存在的情形下植物对各水源的利用比例。在模型的运行时,其中的参数来源增量设为 1%,表示 1% 的增量赋值时植物对每种水源的利用比例;质量平衡公差设为 0.01%,表示各水源同位素值被利用比例加权值之和与植物木质部水的同位素值差异不超过 0.01% 时,比例组合被认为是可能的^[2]。

采用 SPSS19.0 对数据进行单因素方差分析

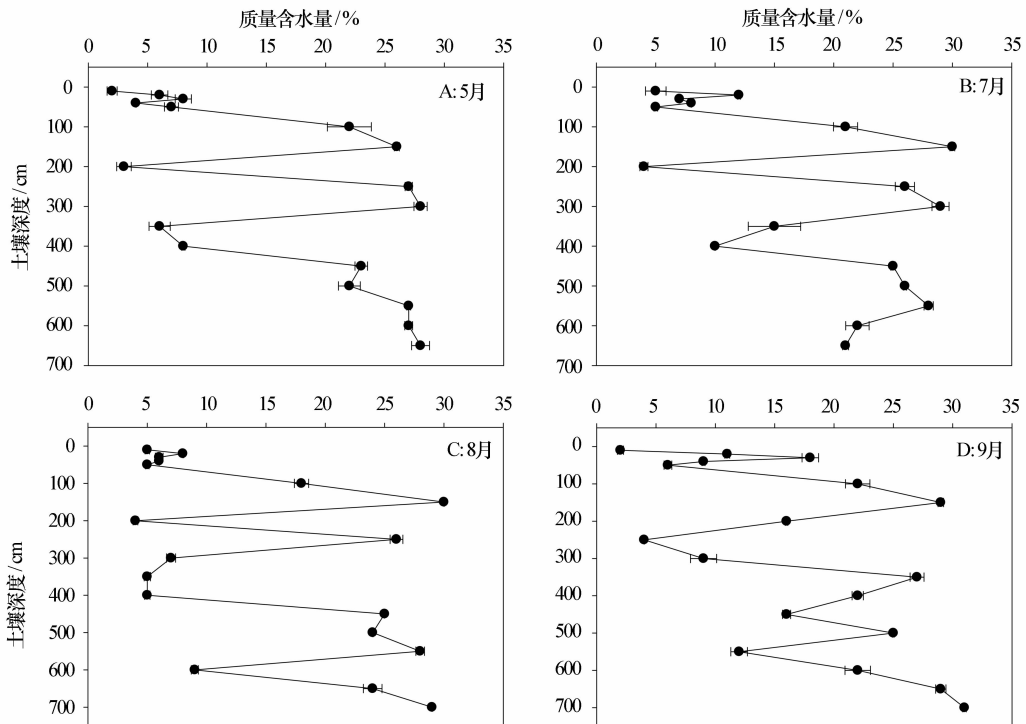


图 1 不同月份样地土壤剖面含水量

Fig. 1 Soil water content in soil profile of different months

2.2 植物木质部水与各潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征

从图 2 可看出浅层土壤水 (<50 cm) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏正,这与浅层土壤受到的强烈蒸发有关。中层土壤水 (50~200 cm) $\delta^{18}\text{O}$ 值随着深度增加而逐

(One-way ANOVA),采用 Sigmaplot12-5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量的变化

不同月份土壤含水量变化如图 1 所示。在垂直变化上,土壤深度 <50 cm 的土壤含水量较低,平均为 7.2%;在 50~200 cm 土层内,土壤含水量随深度的增加而迅速增加,并在 200 cm 处时又明显减少,这很可能是与该层为沙质土壤有关;200 cm 至饱和含水层,土壤含水量整体上随着深度的增加而增加,并且之间存在较大波动,直到饱和含水层土壤含水量保持在 25% 左右。

在时间尺度上,5、7、8 月土壤剖面含水量的变化相差不大,基本保持相同的变化趋势。9 月与前 3 个月有一定的差异,尤其是在 0~50 cm 与 250 cm 至饱和含水层这一范围内 ($P < 0.05$)。

渐偏负,而 200 cm 以下土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化较小。同时,浅层土壤水 (0~50 cm) $\delta^{18}\text{O}$ 值也存在着季节效应,从 5 月到 9 月, $\delta^{18}\text{O}$ 值有增大的趋势,这与不同月的温度、蒸发因素相关。地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 4 个月无显著变化 ($P > 0.05$),平均为 -5.94‰ ,并且与

深层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相接近。

除 9 月成年胡杨木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏负(−6.07‰)外,其他 3 个月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值无明显差异,且保持在−5.08‰左右。柽柳的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 4 个月间无显著变化($P>0.05$),平均为−5.11‰。柽柳和成年胡杨木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值仅在 9 月存在明显差异($P<0.05$),而在其他 3 个月并无明显差异($P>0.05$)。幼龄胡杨的木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 4 个月里存

在小的波动,分别为−5.17‰、−6.10‰、−5.42‰、−6.09‰。骆驼刺 $\delta^{18}\text{O}$ 值除 5 月明显偏正外(1.15‰),其他月之间变化不大,分别为−2.67‰、−2.09‰、−2.32‰。甘草 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 4 个月保持在−2.8‰左右,相对于骆驼刺略偏负。甘草和骆驼刺的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对于胡杨和柽柳明显偏正($P<0.01$),且与 100~150 cm 附近土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相接近(图 2)。

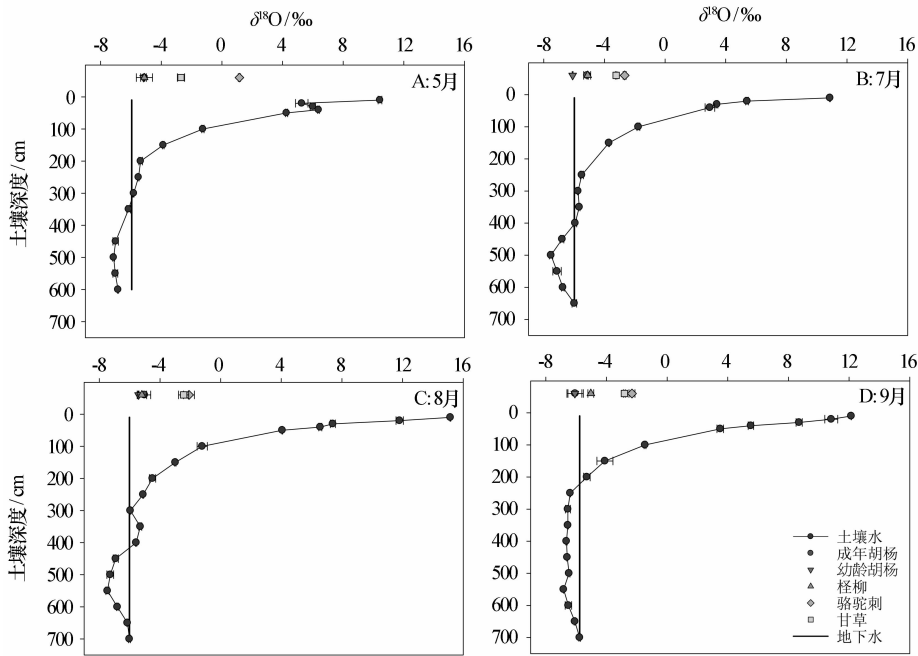


图 2 土壤水、木质部水和地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征

Fig. 2 $\delta^{18}\text{O}$ values of plant water, soil water and groundwater in different months

2.3 植物水分来源的定量分析

按照水源分类的方法,将土壤层合并后,计算各层土壤水和地下水对植物水分来源的贡献率(表 1)。成年胡杨、幼龄胡杨和柽柳在 4 个月都基本不利用浅层(0~50 cm)土壤水(平均利用比例 0.4%~5%)。在生长季初期(5 月)和生长旺季(7、8 月),成年胡杨主要利用深层(200 cm 以下)土壤水(平均 40%)和地下水(平均 39%)的混合水源,而在生长季末期(9 月)则转向利用深层土壤水,平均利用比例为 75.2%。幼龄胡杨在 5 月和 8 月主要利用深层土壤水(平均 41%和 44.2%)和地下水(平均 39.5 和 42.1%)的混合水源,而在 7 月和 9 月则主要利用深层土壤水(平均 66.2%和 75.6%)。柽柳在整个生长季里主要利用深层土壤水和地下水的混合水源,且在生长季对各个水源的利用情况基本不变,例如对中层土壤水的平均利用比例 14.1%~

19.5%,对深层土壤水的平均利用比例 38.7%~42.2%,对地下水的平均利用比例 38.0%~40.4%。骆驼刺在生长季初期主要利用浅层土壤水(平均 56.8%),在生长旺季和末期,对中层土壤水分的平均利用比例较高(约 30%),对其他水源的平均利用比例约 23%。甘草对各水源的利用比例在各个月变化不大,相对来讲,对中层土壤水分利用稍高,约为 33%。

2.4 植物间水分利用关系

在 5、8、9 月,成年胡杨和幼龄胡杨的 PS 指数均大于 0.94(图 3),表明此时成年胡杨和幼龄胡杨之间存在强烈的水分竞争关系,而在 7 月份这种竞争关系有所减弱($PS=0.74$)。成年胡杨与柽柳在 5、7、8 月份的 PS 指数均大于 0.97,表明此时两物种对水源的竞争十分强烈,而在 9 月 PS 指数减少到 0.64,说明在生长季末期两者的水分竞争关系变

表 1 不同月份植物对各潜在水源的利用比例

Table 1 Proportions of feasible water source for plants in different months

植物种类	时间	各潜在水源对植物的平均贡献率及贡献率变化范围/%			
		土壤水			地下水
		0~50 cm	50~200 cm	200 cm	
成年胡杨	5月	4.7(0~11)	15.8(0~37)	40.3(0~86)	39.1(0~92)
	7月	5.0(0~11)	16.0(0~37)	39.6(0~88)	39.5(0~91)
	8月	4.1(0~9)	15.7(0~35)	41.1(0~88)	39.0(0~91)
	9月	0.5(0~2)	4.0(0~11)	75.2(48~97)	20.3(0~52)
幼龄胡杨	5月	4.4(0~10)	15.1(0~35)	41.0(0~88)	39.5(0~90)
	7月	0.7(0~2)	3.3(0~9)	66.2(24~93)	29.9(0~76)
	8月	2.6(0~6)	11.1(0~25)	44.2(0~92)	42.1(0~96)
	9月	0.4(0~2)	3.7(0~10)	75.6(53~98)	20.4(0~47)
怪柳	5月	4.7(0~11)	15.7(0~37)	40.4(0~88)	39.2(0~91)
	7月	5.0(0~11)	16.2(0~37)	40.1(0~87)	38.7(0~92)
	8月	3.3(0~8)	14.1(0~31)	42.2(0~92)	40.4(0~88)
	9月	3.8(0~9)	19.5(0~47)	38.7(0~89)	38.0(0~93)
骆驼刺	5月	56.8(48~62)	18.1(0~49)	12.1(0~35)	13.0(0~38)
	7月	21.7(4~32)	32.7(0~93)	22.5(0~66)	23.1(0~70)
	8月	20.0(6~28)	30.9(0~88)	24.7(0~70)	24.4(0~70)
	9月	21.1(11~28)	29.6(0~86)	24.0(0~71)	25.2(0~75)
甘草	5月	20.1(2~31)	33.1(0~96)	22.9(0~69)	24.0(0~72)
	7月	16.4(0~27)	33.9(0~90)	24.4(0~71)	25.4(0~73)
	8月	17.0(2~26)	33.4(0~94)	24.5(0~73)	25.1(0~75)
	9月	17.5(6~25)	31.3(0~93)	25.1(0~74)	26.1(0~77)

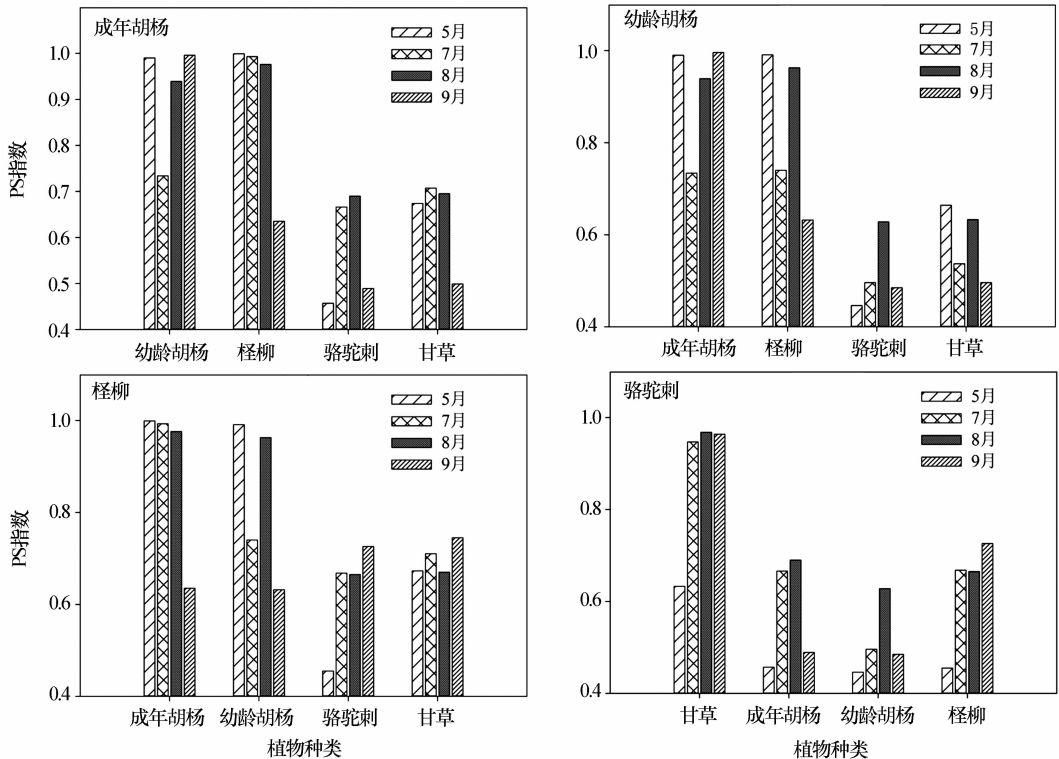


图 3 不同月份植物间的 PS 指数

Fig. 3 Proportional similarity index (PSI) between species in different months

弱。5、8月幼龄胡杨和柽柳的 PS 指数分别为 0.99、0.96,而在 7、9月 PS 指数下降到 0.69 左右,表明两者水分利用关系存在较大的季节性差异。乔灌木(胡杨,柽柳)与草本植物(骆驼刺和甘草)的 PS 指数相对乔灌木间较小,胡杨与骆驼刺、甘草的 PS 指数分别为 0.45~0.69 和 0.50~0.71,柽柳与骆驼刺、甘草的 PS 指数分别为 0.46~0.73 和 0.67~0.75(图 3),表明乔灌木与草本植物之间存在相对较弱的水分竞争关系。然而草本植物间,除 5月 PS 指数为 0.63 外,其他 3 个月 PS 指数都大于 0.94,表明两草本植物间存在强烈的水分竞争关系。

3 讨论与结论

3.1 植物水分来源的差异

在干旱地区,植物依赖于更稳定的水源,对稳定的深层土壤水和地下水的利用使植物具有更强的生存能力,确保其在极端缺水的干旱区存活^[30]。在生长季的不同月里,成年胡杨、幼龄胡杨和柽柳都主要利用稳定的深层土壤水或地下水和深层土壤水的混合水源。前人研究一般表明幼龄胡杨主要利用浅层土壤水,而成年胡杨主要利用深层土壤水和地下水^[16,31],本研究却发现幼龄胡杨与成年胡杨的水分来源相类似。这很可能与塔里木河下游胡杨繁殖方式相关。由于通过种子萌发的实生胡杨幼苗对水分的要求较高,在塔里木河下游难以满足此情形。因此,胡杨主要通过无性根蘖进行繁殖来替代种子繁殖,幼苗在一定时间内与成年胡杨根系相连接,水分和营养来源由成年胡杨进行供给^[32]。在生长季的不同月里,柽柳主要利用深层土壤水和地下水的混合水源,且这种水分获取方式在整个生长季保持一致,这表明干旱区的柽柳更依赖于稳定的深层水源,并对土壤水分波动响应不敏感。相对来说,柽柳在水源利用的稳定性上优于胡杨,这从侧面印证了柽柳适应干旱的能力强于胡杨,与樊自立等^[33]研究结果相一致。

许多学者都认为共生的木本植物和草本植物依赖于不同垂直深度上的土壤水分^[34-35]。在干旱生境下,乔灌木经常生长较长的主根,使它们能单独的获取较深层次的土壤水分,而草本植物通过发展浅根系以竞争浅层土壤水^[35]。本研究中骆驼刺的水分获取方式在不同月有差异。在生长季初期,骆驼刺对浅层土壤水分的利用比例很大,在生长旺季和生长季末期对浅层土壤水分的利用比例减少,而对中、深层的土壤水和地下水的利用比例升高,并且利

用比例趋于稳定(表 1)。骆驼刺属于多年生根源型草本克隆植物,可通过深根系与地下水相连接,所以在极端干旱的土壤上仍能良好生长,在表层土壤水分条件好的情况下能够发展水平根系吸收水分,也就是说骆驼刺水源利用的差异与其根系的分布特征密切相关,并不是仅靠浅层根系来获取水分^[36]。

朱建佳等^[37]对柴达木盆地 4 种典型荒漠植物研究发现这 4 种荒漠灌木在生长季里能够灵活地利用各种水源,其他学者研究也表明在干旱地区,植物在利用水源上存在较大的季节性差异^[1,25]。但是,本研究中的 4 种荒漠植物对不同水源的利用比例在整个生长季变化不大,尤其是柽柳与甘草,随时间变化波动很小。这是因为处在极端干旱区的塔里木河下游,降水极有限,浅、中层土壤水补给来源受限,同时又面临着强烈蒸发,使得浅、中层土壤水分含量较低,植物为了生存只能依赖于深层土壤水和地下水。而深层土壤水主要是通过地下水毛管上升补给的,因此,地下水是维持荒漠植物生长的决定性因素^[38-41]。

3.2 植物间水分利用关系

植物木质部水的 $\delta^{18}O$ 值是各种潜在水源 $\delta^{18}O$ 值混合的结果,作为植物水分来源的一个指示指标,可以根据植物木质部水的 $\delta^{18}O$ 值来推断植物主要水源的大致层位^[5,16],进而依据不同植物木质部水的 $\delta^{18}O$ 值来判断植物间的水分竞争关系。也就是说,当不同植物木质部水的 $\delta^{18}O$ 值之间没有差异时,植物共用一致的土壤水、地下水或其他水源^[26]。在本研究中,成年胡杨、幼龄胡杨和柽柳的在生长季的不同月份里木质部水的 $\delta^{18}O$ 值很接近,仅在少数月份出现变化,表明三者之间在生长季里存在着强烈的水分竞争关系,这也是在塔里木河下游胡杨林与柽柳林相分离、一般不大面积相伴而生的原因。骆驼刺与甘草的木质部水 $\delta^{18}O$ 值在生长季较接近,表明两者之间的也存在较强的水分竞争。同样地,乔、灌木(成年胡杨、幼龄胡杨、柽柳)与草本(骆驼刺、甘草)间 $\delta^{18}O$ 值的差异性也说明了它们的水分竞争关系较弱。 PS 指数是表征植物之间生态位重叠的指标,可以用来评估植物之间的水分竞争关系^[28]。本研究中,各植物间 PS 指数的结果(图 3)与利用植物间 $\delta^{18}O$ 值对比方法所得的结果一致,进一步证实了上述荒漠植物间的水分利用关系。

3.3 结论

在塔里木河下游,柽柳、成年胡杨、幼龄胡杨几

乎都不利用 0~50 cm 的表层土壤水,而主要利用 200 cm 以下的深层土壤水和地下水,而甘草和骆驼刺主要吸收 50~200 cm 深度的土壤水。

成年胡杨、幼龄胡杨和柽柳对各水源的利用比例在生长季的不同月份里基本一致(7、9月有一定差异),且三者间 *PS* 指数都在 0.9 以上(除 9 月外),乔灌木之间存在着明显的水分竞争关系。除 5 月外,甘草和骆驼刺的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相接近,且 *PS* 指数在 0.94 以上,草本植物间存在强烈的水分竞争关系。但是乔灌木与草本之间的水分竞争关系相对较弱。因此,在干旱区进行植被生态恢复建设时应尽量避免将胡杨和柽柳两物种混合种植。

在整个生长季(除个别月份外),无论是乔木胡杨,还是灌木柽柳,水分来源都主要是较稳定的深层水源,且对各水源的利用比例在不同月份波动不大。这说明在塔里木河下游极端干旱环境下,乔灌木植物为了生存需依靠较稳定的深层土壤水或地下水。

参考文献:

- [1] 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,2014,4(21):6277-6286.
- [2] 杨国敏,王力.黑岱沟露天矿区排土场 2 种典型植物的水分来源及利用策略[J].自然资源学报,2016,31(3):477-487.
- [3] Song L N, Zhu J J, Li M C, et al. Sources of water used by *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees based on stable isotope measurements in a semiarid sandy region of Northeast China [J]. Agricultural Water Management, 2016, 164: 281-290.
- [4] Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K, et al. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment [J]. Journal of Hydrology, 1995, 167(1/4): 351-368.
- [5] 余绍文,孙自永,周爱国,等.用 D 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素确定黑河中游戈壁地区植物水分来源[J].中国沙漠,2012,32(3):717-723.
- [6] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water [J]. Nature, 1991, 350(6316): 335-337.
- [7] Busch D E, Ingraham N L, Smith S D. Water uptake in woody riparian phreatophytes of the southwestern United States: a stable isotope study [J]. Ecological Applications, 1992, 2(4): 450-459.
- [8] Meissner M, Koehler M, Schwendenmann L, et al. Partitioning of soil water among canopy trees during a soil desiccation period in a temperate mixed forest [J]. Biogeosciences, 2012, 9(8): 3465-3474.
- [9] Sternberg L D S L, Swart P K. Utilization of freshwater and ocean water by coastal plants of southern Florida [J]. Ecology, 1987, 68(6): 1898-1905.
- [10] 李鹏菊,刘文杰,王平元,等.西双版纳石灰山热带季节性湿润林内几种植物的水分利用策略[J].云南植物研究,2008,30(4):496-504.
- [11] 王平元,刘文杰,李金涛.西双版纳绞杀植物斜叶榕的水分利用策略[J].应用生态学报,2010,21(4):836-842.
- [12] 容丽,王世杰,俞国松,等.荔波喀斯特森林 4 种木本植物水分来源的稳定同位素分析[J].林业科学,2012,48(7):14-22.
- [13] 聂云鹏,陈洪松,王克林.石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异[J].植物生态学报,2011,35(10):1029-1037.
- [14] Leng X, Cui J, Zhang S T, et al. Differential water uptake among plant species in humid alpine meadows [J]. Journal of Vegetation Science, 2013, 24(1): 138-147.
- [15] 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.
- [16] 刘树宝,陈亚宁,李卫红,等.黑河下游不同林龄胡杨水分来源的 D 、 ^{18}O 同位素示踪[J].干旱区地理,2014,37(5):988-995.
- [17] 朱绪超,袁国富,邵明安,等.塔里木河下游河岸带植被的空间结构特征[J].植物生态学报,2015,39(11):1053-1061.
- [18] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等.新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J].生态学报,2007,27(2):538-545.
- [19] 朱成刚,李卫红,马晓东,等.塔里木河下游干旱胁迫下的胡杨叶绿素荧光特性研究[J].中国沙漠,2011,31(4):927-936.
- [20] 张元明,陈亚宁,张小雷.塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释[J].地理学报,2004,59(6):903-910.
- [21] 李卫红,郝兴明,覃新闻,等.干旱区内陆河流域荒漠河岸林群落生态过程与水文机制研究[J].中国沙漠,2008,28(6):1113-1117.
- [22] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等.塔里木河下游地下水位对植被的影响[J].地理学报,2003,58(4):542-549.
- [23] 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.
- [24] 肖雄,李小雁,吴华武,等.青海湖流域高寒草甸壤中流水分来源研究[J].水土保持学报,2016,30(2):230-236.
- [25] Dai Y, Zheng X J, Tang L S, et al. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert [J]. Plant and Soil, 2015, 389(1/2): 73-87.
- [26] Midwood A J, Boutton T W, Archer S R, et al. Water use by woody plants on contrasting soils in a savanna parkland: assessment with $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ [J]. Plant and Soil, 1998, 205(1): 13-24.
- [27] Hoekstra N J, Finn J A, Hofer D, et al. The effect of drought and interspecific interactions on depth of water uptake in deep- and shallow-rooting grassland species as determined by delta O-18 natural abundance [J]. Biogeosciences, 2014, 11(16): 4493-4506.
- [28] Troglisch S, Salmon Y, He J S, et al. Spatio-temporal water uptake patterns of tree saplings are not altered by interspecific interaction in the early stage of a subtropical forest [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 367: 52-61.
- [29] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [30] 石辉,刘世荣,赵晓广.稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J].水土保持学报,2003,17(2):163-166.
- [31] Liu S B, Chen Y N, Chen Y P, et al. Use of ^2H and ^{18}O stable isotopes to investigate water sources for different ages of

- Populus euphratica* along the Lower Heihe River[J]. Ecological Research, 2015, 30(4): 581—587.
- [32] 武逢平, 李俊清, 李景文, 等. 胡杨(*Populus euphratica*) 在额济纳绿洲三种生境内的根蘖繁殖特性[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4703—4709.
- [33] 樊自立, 徐海量, 傅彦仪, 等. 塔里木河下游生态保护目标和措施[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1191—1197.
- [34] Noymeir I. Desert ecosystems: environment and producers[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 25—51.
- [35] Darrouzet-Nardi A, D'Antonio C M, Dawson T E. Depth of water acquisition by invading shrubs and resident herbs in a Sierra Nevada meadow[J]. Plant and Soil, 2006, 285(1/2): 31—43.
- [36] 罗维成, 曾凡江, 刘波, 等. 疏叶骆驼刺母株与子株间的水分整合[J]. 植物生态学报, 2013, 37(2): 164—172.
- [37] 朱建佳, 陈辉, 邢星, 等. 柴达木盆地荒漠植物水分来源定量研究——以格尔木样区为例[J]. 地理研究, 2015, 34(2): 285—292.
- [38] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 538—545.
- [39] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 塔里木河下游地下水埋深与建群植物盖度之间的耦合模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 104—108.
- [40] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 塔里木河下游优势草本植物与地下水埋深的关系[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 216—224.
- [41] 周天河, 赵成义, 吴桂林, 等. 塔里木河上游胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)水分来源的稳定同位素示踪[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 124—131.

Water Sources of Typical Desert Riparian Plants in the Lower Reaches of Tarim River

Wang Yuyang^{1,2}, Chen Yapeng¹, Li Weihong¹, Wang Rizhao^{1,2}, Zhou Yingying^{1,3}, Zhang Jianpeng^{2,4}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054; 4. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Lower Reaches of the Tarim River is featured with an extraordinary dry and hot climate. Vegetation here has a harsh environment to survival, and water is the most crucial ecological factor. The research of water sources used by desert plants in the growing season helps to understand the water use strategy of the desert plants, which will be useful to vegetation reconstruction in the Lower Reaches of Tarim River. In this study, the stable oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) of stem water of four dominant plant species, groundwater and soil water in the lower reaches of Tarim River were measured in May, July, August and September, 2015. And then we used the Multi-source mixed liner model (IsoSource) to analyze the probable contribution of potential water sources used by these dominant desert plants. In addition, we use the proportional similarity index (PSI) to analyze the water use relationship between different desert plants. The result indicated that: (1) in the Lower Reaches of Tarim River, *Populus euphratica* oliv (young and mature) and *Tamarix ramosissima* can hardly use soil water stored at 0—50 cm depth, but mainly uptook deep soil water stored below 200 cm depth and groundwater, *Glycyrrhiza inflata* and *Alhagi spar folia* mainly acquired soil water stored at 50—200 cm depth. (2) During growing season, *P. euphratica* oliv (young and mature) and *T. ramosissima* had a fierce water competition, except for individual months. *lycyrrhiza inflata* and *Alhagi spar folia* also had a strong water competition, however, *P. euphratica* oliv (young and mature) and *T. ramosissima* had a weak water competition with *G. inflata* and *A. spar folia*. (3) In order to adapt extremely drought environment, *P. euphratica* oliv (young and mature) and *T. ramosissima* had a stable water sources, and the feasible proportion of water sources used by different plants had a slight fluctuation in the Lower Reaches of Tarim River.

Key words: Tarim River; desert plant; water sources; stable isotopes