



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.015

陆凯, 于静洁, 王平, 等. 干旱区植物用水对水文条件的响应[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 88-94, 172. LU Kai, YU Jing jie, WANG Ping, et al. The response of plant water use strategy to hydrological conditions in arid areas: A case study of *Populus euphratica* in Ejina Delta[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 88-94, 172. (in Chinese)

干旱区植物用水对水文条件的响应

——以额济纳三角洲胡杨为例

陆 凯^{1,2}, 于静洁¹, 王 平¹, 李亚飞^{1,2}, 李 蓓^{1,2}

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 植物用水对水文条件的响应是干旱区生态水文学的重点研究内容。本研究以额济纳三角洲为研究区, 选取水文条件不同的典型河岸带植物胡杨(*Populus euphratica*)为研究对象, 同步采集其根茎及可能为植物提供水分的土壤并真空抽提水分, 同时采集河水 and 地下水水样, 通过 $\delta^{18}\text{O}$ 分析潜在供水水源(河水、地下水)-土壤水-植物水之间的水分响应关系。研究发现, 对于距离过水河道75 m(地下水埋深2.0 m)的胡杨, 其主要土壤供水层在1.0~2.0 m, 植物水分有93.7%来自河水; 而距离过水主河道2 km以外(地下水埋深3.3 m)的胡杨, 主要吸收1.4~3.2 m的土壤层水分, 地下水(由河水补给, 但在含水层停留时间较长的河水)对胡杨水分的贡献比例达到80.0%。可见, 胡杨用水策略与模式受其距过水河道远近、地下水位深浅影响明显。

关键词: 干旱区; ^{18}O ; 水文条件; 胡杨; 水分来源

中图分类号: G948 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0088-07

The response of plant water use strategy to hydrological conditions in arid areas: A case study of *Populus euphratica* in Ejina Delta

LU Kai^{1,2}, YU Jing-jie¹, WANG Ping¹, LI Ya-fei^{1,2}, LI Bei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The response of plant water use strategy to hydrological conditions is important for ecological hydrological research in arid areas. In the present paper, we studied a typical riparian plant, *Populus euphratica*, under different hydrological conditions in Ejina delta. We simultaneously collected samples of the plants' xylem as well as the surrounding soil and extracted their water with a cryogenic vacuum extraction system. Meanwhile, we collected river water and groundwater samples. The $\delta^{18}\text{O}$ of these samples were tested to analyze the relationship between potential water sources (river water, groundwater), soil water, and plant water by the isotopic mass balance model. The results indicated that the *Populus euphratica* that stands 75 m away from riverbank with a 2 m deep water table mainly consumes water from the 1.0~2.0 m deep soil layer and 93.7% of the plant water is from the river. The *Populus euphratica* that stands 2 km away from riverbank with a 3.3 m deep water table mainly absorbs soil water that is 1.4~3.2 m deep, and ultimately 80.0% of the plant water comes from groundwater (river water that stays long in the aquifer). It can be seen that the water use strategy of *Populus euphratica* varies significantly with their distance from river

收稿日期: 2016-05-11 修回日期: 2016-11-14 网络出版时间: 2017-01-04
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0937.017.html>
基金项目: 国家自然科学基金(41571029; 41371059)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41571029; 41371059)

作者简介: 陆 凯(1989), 男, 江苏江阴人, 主要从事生态水文研究。E-mail: luk.13s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 于静洁(1964), 女, 吉林四平人, 研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yujj@igsrr.ac.cn

bank and groundwater table depth.

Key words: arid area; ^{18}O ; hydrological condition *Populus euphratica*; water sources

在降水少、风沙多的荒漠生态系统中,水是植被发育、群落演替和生态结构与功能的最重要控制因子^[1,3]。研究表明,干旱环境中的植物为适应水分供应条件的变化,会通过调整水分利用模式以适应严重缺水环境^[4]。不同类型、不同地理位置的植物,对不同水源的依赖性和敏感性不同,具有不同的用水策略和模式,并存在竞争和协同^[5]。在降水稀少的极端干旱区,地表、地下水资源是维系荒漠区河岸林最重要的因子^[5],距过水河道远近及不同的地下水埋深等水文条件都会影响植物水分利用。胡杨(*Populus euphratica*)是杨柳科(*Salicaceae*)杨属(*Populus*)最古老的树种,是唯一能在中国荒漠绿洲去自然形成大面积森林的落叶中型天然乔木^[6]。其在中国西北干旱区内陆河流域河岸带广泛分布,有着耐盐碱的特性和抗干旱、抗风沙等重要的生态保育功能。作为干旱区内陆河流域荒漠区河岸林的主要优势种,胡杨生长地的水文条件变化对其水分来源结构的影响问题一直是众多学者关注的热点^[1,7-8]。

氢氧稳定同位素技术被认为是对植物和土壤破坏性较低而精确度较高的判定植物水分来源的方法,已被广泛应用于环境脆弱、植被稀少的干旱、半干旱地区的生态水文研究^[9,10]。Smith等人^[11]在Eastern Sierra对河岸群落的研究表明,在生长季,优势植物由非生长季的主要利用土壤水转为主要利用地下水。Dawson和Ehleringer^[12]利用氢稳定同位素(^2H)对美国犹他州山间的河流与橡-槭灌木植物群落水分利用关系进行了研究,发现幼龄树木和成熟树木对河水的选择利用不相同:只有幼龄树木会吸收利用河水,而即便是生长在河流旁边,成熟树木也几乎不利用河水。Ehleringer等^[13]在研究了生长在美国犹他州沙地中的植物后发现一年生植物和浅层根系的沙漠肉质植物均主要利用夏季自然降雨的水分,而多年生深根植物没有利用夏季降水,多年生木本植物对夏季降水、冬季降水、地下水都有利用。Li等^[14]研究了华北太行山地区典型的刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)为主以及黄背草(*T. japonica* (Willd.) Tanaka)和白羊草(*B. ischaemum* (L.) Keng)等草类为主的两个区域,研究发现在6月至9月,两处区域的土壤水渗透速率分别为12 mm/d以及10 mm/d,而土壤水补给地下水的速率则分别为3.8 mm/d以及3.2 mm/d。赵良菊等^[11]

分析了黑河下游河岸林植物的水分来源,结果发现乔木和灌木利用地下水的比例较高,草本植物则主要利用降水和河水。周雅聘等^[15]对比了不同年降雨量白刺和油蒿的水分利用情况,结果表明,在降水量多于200 mm时,白刺和油蒿的水分吸收则从主要为地下水和深层土壤水转变为更多利用浅层土壤水。朱雅娟等^[16]对巴丹吉林沙漠东南部的白刺灌丛进行增雨试验后发现,当年降雨量增加一倍时会显著增加白刺对降水的利用比例。朱建佳等^[17]研究了柴达木盆地典型地带性荒漠灌木后发现,在生长季初期,植物主要利用河水和地下水;生长季中后期,则主要利用土壤水和地下水。

综上,水文条件不同会对植物水分利用策略产生明显的影响。在中国西北干旱区内陆河流域下游,为保护下游生态环境,生态输水成为植被恢复和保护的重要途径。位于黑河下游额济纳绿洲河岸带的胡杨林,是典型的湿生植被,生态输水时间和输水量的变化会直接导致额济纳绿洲河水和地下水水位的变化,从而影响胡杨对水分的吸收效率。本文旨在探究胡杨用水对水文条件变化的响应,为制定科学合理的生态输水方案并提高生态用水效率提供理论依据。

1 研究区概况

额济纳三角洲位于我国西北地区的中国第二大内陆河——黑河的下游,是由黑河狼心山水文站以下的东、西两河及其漫流冲积形成的扇形三角洲。本次将研究区的范围界定为狼心山水文站以下,东、西两河两侧20 km范围内,包括两河的尾闾湖东、西居延海(图1(a)),地理位置介于 $100^{\circ}00' - 101^{\circ}30' \text{E}$, $41^{\circ}00' - 42^{\circ}30' \text{N}$,面积约8 022 km^2 ^[18]。该区域为典型的大陆性干旱气候,根据额济纳旗气象站1960年-2012年的观测资料统计:多年平均降水量34 mm,最大年降水量103 mm,最小年降水量7 mm;年蒸发能力1 400~1 600 mm ^[19,20]。河水的补给孕育出了河流沿岸的河岸带绿洲,河岸带绿洲内的土壤多是草甸土、盐化草甸土、风沙土等,局部有盐化沼泽土和沼泽盐土出现,河岸带绿洲区内植被主要以胡杨、红柳(*Tamarix ramosissima*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)等为主^[21]。研究区内整体地势从西南向东北逐渐倾斜,坡降在1‰~3‰^[22],三角洲内除沿河区植被分布较为集中外,大

部分是戈壁、低山丘陵风蚀地、沙漠和盐碱地。

区域内含水层系统的主体为第四系地层,第四系松散沉积物颗粒由南向北逐渐变细,厚度为 50~500 m,其孔隙含水层中存储着丰富的地下水^[23],含水层岩性以中细砂、粉细砂,黏土夹层为主;北部东、西居延海至中蒙边界一带,含水层组成以冲、洪积物为主,岩性主要为砂、砂黏土、黏土(图 1b^[24])。研究区浅层地下水储量在时间上呈周期性变化,通常为 9 月至次年 3 月正均衡,4 月至 8 月负均衡^[21]。空间上地下水位变化与处于河岸带绿洲区或者戈壁带有关,河岸带绿洲区的地下水补给的主要方式为河床渗漏补给,通常夏季河道过水时长在一周左右,冬季过水长达数月,胡杨、红柳等的蒸散耗水是天然绿洲区主要地下水排泄途径。对于农田较多的人工绿洲区,地下水开采及灌溉等社会经济用水对地下水位影响明显,而荒漠带则以区域地下水侧向补给和潜水蒸发为主^[25]。

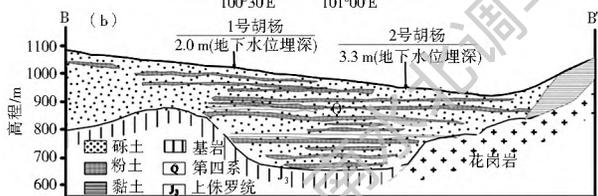
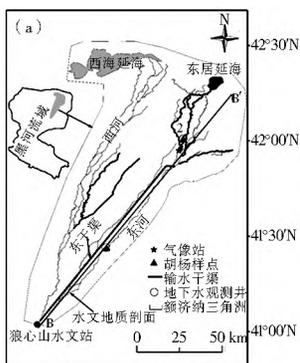


图 1 研究区示意图(a)及水文地质剖面图(b)

(修改自闵雷雷(2013)^[24])

Fig. 1 Location of study area (a) and geological cross section (b)

(modified from Min L L., 2013)

2 试验材料与方法

2.1 样品采集

2.1.1 胡杨植株样本选择

本研究选择了胡杨植株为研究对象,作为河岸带典型植物的胡杨,主要分布在额济纳三角洲东、西河及其支流沿岸,其对应地下水位埋深在 1.5~3.5 m 之间变化。

本研究根据距主河道远近以及地下水位埋深不同在研究区选择了不同水文条件的两株胡杨样本

(植株位置见图 1a),时间上选择在典型生长季阶段的 2015 年 7 月,利用氧稳定同位素(^{18}O)进行了胡杨水分来源的示踪。空间上,选择了典型的河道上游且距河道较近以及处于河道下游且距河道较远的两株胡杨:1 号胡杨处于东河上游,距离过水主河道 75 m,采样时地下水位埋深为 2.0 m,其胸径、树高分别为 0.8 m、5.5 m;2 号胡杨处于东河下游,距离东河过水主河道 2 km 以上,采样时地下水位埋深为 3.3 m,对应的胸径、树高分别为 0.4 m、10.5 m。两株胡杨附近均有地下水观测井(对应为 1 号及 2 号观测井),相应地下水位埋深月均变化情况见图 2,可以发现 1 号及 2 号观测井的地下水位埋深在生长季(5 月~9 月)分别在 2.0~2.5 m 以及 1.5~3.3 m 之间波动。

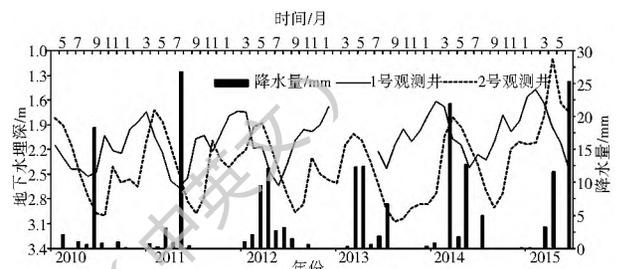


图 2 研究区观测井地下水埋深及降水量变化情况

Fig. 2 Fluctuation of groundwater table depth and precipitation in the study area

2.1.2 样本采集与存储

植物样本采集:在所选胡杨的阳面中部采集 4~5 cm 长的非绿色枝条,除去韧皮部,保留木质部,装入 8 ml 螺纹密封玻璃取样瓶中,用 parafilm 密封膜封口、冷藏保存,每株胡杨采集 4 个重复样品。

土壤样品采集:根据土壤剖面土壤质地调查结果,将 1 号及 2 号胡杨对应土壤剖面分别划分为 5 层及 6 层,使用土钻采集每层土壤样品 2 个,分别装入 10 ml 玻璃试管中,用 parafilm 膜密封并冷藏保存;对于含水量较低的土样,取 3 个重复样品,以获得足够的水样(0.5 ml)进行 $\delta^{18}\text{O}$ 检测。

河水、地下水样品采集:由于研究区年均降水较少(仅 34 mm,见图 2),几乎没有水分可以入渗到土壤中并对植物进行水分补给^[19,20],因而此途径对胡杨水源的贡献可忽略不计,本研究只考虑河水和地下水对胡杨水源的贡献。在狼心山水文站监测断面于放水期间每天 8:00 采集河道水样品,本次同期采集河水样 3 次,每次采集两个样品。在 1 号及 2 号观测井同步采集地下水样各两个,所有水样均装入 8 ml 螺纹玻璃瓶中,将空气排净后拧紧瓶盖,用 parafilm 膜密封并冷藏保存。

2.2 样品预处理及同位素测定

2.2.1 土壤、植物样品的水分抽提

采用低温真空抽提系统对土壤、植物样品中的

水分进行抽提。本试验在中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室进行,所用仪器为植物土壤水分真空抽提系统(LF-2000)。对抽提前后各试管及样品质量进行称重,保证抽提水以及收集水效率在98%以上;同时保证抽提样品足量,使提馏获取水分至少满足 $\delta^{18}\text{O}$ 测定所需的最低用量(0.5 ml)。

2.2.2 水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 测定

由于2H在干旱植物茎内传输可能存在分馏^[26,28],故本研究中仅利用 $\delta^{18}\text{O}$ 进行示踪分析。植物水样、土壤水样、地表水样、地下水样的氧同位素测定在中国科学院地理科学与资源研究所生态网络实验室进行,所用仪器为LGR液态水同位素分析仪(LGR-DLT-100)。 $\delta^{18}\text{O}$ 值表示为与“标准平均海洋水”的千分差,仪器测量精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。每个样品测定6次,为减少样品之间的相互干扰,忽略前2次的测定结果,仅取后4次测定结果的平均值作为该样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

2.2.3 植物茎秆水同位素的光污染校正

由于低温抽提获取的植物茎秆水和土壤水中含有甲醇、乙醇类物质,而利用稳定同位素光谱技术进行 $\delta^{18}\text{O}$ 测定时,这些物质会造成 $\delta^{18}\text{O}$ 测定结果贫化或富集,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高或偏低,因此需对仪器的测定结果进行光污染校正。

校正的方法为:利用同一来源的纯水,配置不同浓度的甲醇和乙醇水溶液,进行 $\delta^{18}\text{O}$ 测定。甲醇和乙醇分别影响测定结果的窄带光谱度量值(NB, narrow-band metric)和宽带光谱度量值(BB, broad-band metric),因此利用甲醇溶液的测定结果建立NB和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ (甲醇溶液的 $\delta^{18}\text{O}$ 测定值与纯水样 $\delta^{18}\text{O}$ 测定值的差)曲线,利用乙醇溶液的测定结果建立BB和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ (乙醇溶液的 $\delta^{18}\text{O}$ 测定值与纯水样 $\delta^{18}\text{O}$ 测定值的差)的曲线^[29,30]。根据样品测定结果的NB和BB值,从校正曲线的拟合公式中,得到NB校正值、BB校正值。校正后的样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值为仪器测定结果、NB校正值、BB校正值之和。

2.3 植物水分来源分析方法

2.3.1 判断植物水分来源总体思路

基于植物茎秆(根茎)水来自根系吸收的土壤水,且在植物体内同位素含量无差异这一假设^[31],根据“植物水同位素测量值与某层土壤水的相近或相似”这一特征确定植物水主要来自于哪一个或几个层位土壤。本研究假定 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对变化率小于5%,则视为相似(公式(1)),再根据不同水源对该深

度土层土壤水贡献的比例关系,确定植物水中不同水源的比例。

$$\alpha = \frac{\delta^{18}\text{O}_P - \delta^{18}\text{O}_{si}}{\frac{\delta^{18}\text{O}_P + \delta^{18}\text{O}_{si}}{2}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为某层土壤样与植物样 $\delta^{18}\text{O}$ 值的相对变化率(%); $\delta^{18}\text{O}_P$ 为植物水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta^{18}\text{O}_{si}$ 为第*i*层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

2.3.2 植物水分来源、组成比例定量划分

土壤水是植物的直接供水来源,由公式(1)计算所得 α 小于5%时,则假定对应层位土壤水为植物水分的主要供给来源。计算的基本原理为稳定同位素的质量守恒,公式如下:

$$\delta^{18}\text{O}_{s均} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{si} \delta^{18}\text{O}_{si} \quad (2)$$

$$\delta^{18}\text{O}_{s均} = f_{\text{河水}} \delta^{18}\text{O}_{\text{河水}} + f_{\text{地下水}} \delta^{18}\text{O}_{\text{地下水}} \quad (3)$$

$$1 = f_{\text{河水}} + f_{\text{地下水}} \quad (4)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}_{s均}$ 为 α 小于5%时对应层位土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值; $\delta^{18}\text{O}_{si}$ 为 α 小于5%的不同层位中第*i*层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; f_{si} 表示第*i*层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值占 $\delta^{18}\text{O}_{s均}$ 的比例系数; n 为 α 小于5%的对应土壤层位数。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{河水}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{地下水}}$ 为对应胡杨样本的河水及地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $f_{\text{河水}}$ 、 $f_{\text{地下水}}$ 表示河水及地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对 $\delta^{18}\text{O}_{s均}$ 的贡献比例系数。

3 结果与讨论

3.1 植物水分来源判断

通过对比植物水样与对应点不同深度土壤水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值可以判断植物水分的主要来源。两个样本胡杨植株处对应不同水体(植物水、土壤水、河水以及地下水)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值见图3,胡杨植株与各深度土壤的 $\delta^{18}\text{O}$ 相对变化率(α)信息见表1。

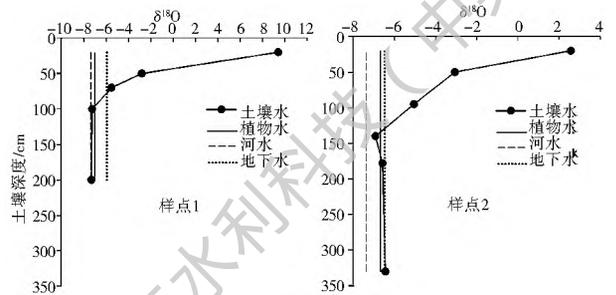


图3 不同水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ of different water sources

由表1可见,1号胡杨处 α 小于5%的土壤深度范围为100~200 cm,表明该胡杨水分主要供给土层位于地表以下100~200 cm处。在2号胡杨处, α 小于5%的土壤深度范围为140~320 cm,表明该胡杨水分来源于地表以下140~320 cm的土壤层。

表 1 胡杨样本的 α 值及地下水位埋深

Tab. 1 The α value and groundwater table depth of *Populus* sites

胡杨	测定土层深度/cm	α	地下水位埋深/m
1 号	20	1368.33	2.0
	50	85.54	
	70	23.78	
	100	3.23*	
	200	4.33*	
2 号	50	74.33	3.3
	95	27.79	
	140	3.53*	
	178	1.51*	
	320	3.66*	

注: * 表示土壤剖面某层土壤水样对应 α 小于 5%。

3.2 植物水分来源组成比例的定量化

根据公式(2)至(4)计算获得地下水及河水对两株胡杨主要土壤供水层水分贡献百分比(表 2)。由表 2 可知, 1 号胡杨处, 其主要土壤供水层的水分有 6.3% 来自地下水, 而其余的 93.7% 则来自河水。根据植物茎秆水来自根系吸收的土壤水, 且在植物体内同位素含量无差异这一原理, 以及植物水分全部来自主要供水层土壤水, 得到河水对 1 号胡杨水分贡献率达到 93.7%, 地下水贡献了 6.3%。2 号胡杨处, 140~320 cm 土壤范围为其主要水分供给层, 同理, 通过计算发现, 该胡杨植株有 80.0% 的水分来自地下水, 20.0% 的水分来自地表水。

表 2 河水、地下水对胡杨水分贡献百分比

Tab. 2 Contribution percentage of groundwater and river flow to plant water consumption

胡杨	主要土壤供水层范围/cm	地下水、河水对主要土壤供水层水分贡献百分比(%)	
		地下水	河水
1 号	100~200	6.3	93.7
2 号	140~320	80.0	20.0

3.3 讨论

在 1 号胡杨处, 由图 2 可知该处地下水位埋深在 1.5~2.5 m 之间波动, 而 Wang 等^[20]研究表明, 河岸带地下水对河道过水响应的滞后时间为 5~7 d 左右。本次采样时间是在河道过水一周之后, 地下水已经受到河水的渗漏补给。可以推测, 在地下水潜水面上的土壤水也间接得到河水的补给, 而本研究对土壤剖面的调查(见图 4)可知, 位于 1.0~2.0 m 的土壤为潜水面上方过水能力较强的细砂土, 波动明显的地下水可以直接进入该土层对其进

行补给, 这与结果中 1.0~2.0 m 的主要土壤供水层有 93.7% 的水分来源于河道过水相吻合。同时土壤质地的垂向分布显示 1.0 m 深处左右的土壤为粉壤土, 相对其它深度的土壤质地来说更适合吸水根系(毛根)的生长^[32], 结合该处地下水位埋深较浅(2 m), 进一步说明同位素示踪得到的胡杨吸水的土壤层位具有合理性。

2 号胡杨处于下游且远离过水主河道, 河水渗透补给地下水相比 1 号胡杨需要较长时间, 且还会受到河水漫溢(为了灌溉河岸带植被, 有时会人为调控该处漫溢情况)影响, 即会接受河道侧向补给和漫溢的河水的垂向补给。Min 等^[33]发现在额济纳三角洲下游, 河床的渗透系数为 0.06 m/d, 远小于上游的 12~27.6 m/d。本次采样时, 该处并没有遭遇河水漫溢, 样点距离过水河道较远, 这是导致河水贡献比重低于地下水的原因。示踪得到的主要供水土壤深度 1.4~3.2 m 处, 与该处的地下水位埋深在生长季波动幅度大(1.5~3.3 m)、土壤质地与结构(见图 5)、以及根系层主要分布深度^[34]等具有很好的对应关系。

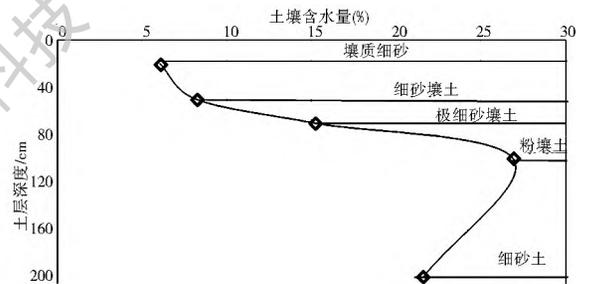


图 4 1 号胡杨处土壤重量含水量及土壤质地变化情况

Fig. 4 Soil gravimetric water content and soil texture at *Populus* site 1

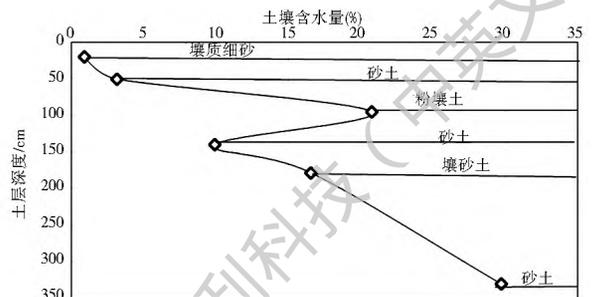


图 5 2 号胡杨处土壤重量含水量及土壤质地变化情况

Fig. 5 Soil gravimetric water content and soil texture at *Populus* site 2

本研究中河岸带植物胡杨的水分潜在来源主要为河水和地下水, 额济纳三角洲的地下水基本上是来自河水渗透补给^[20,23], 河岸带的地下水则几乎全部来自于河水。本研究对于河水、地下水及土壤水主要吸水层位的判定结果, 与土壤植物大气系统水量传输研究成果相结合, 可为面向河岸林保护

的生态输水调控管理提供更为科学的依据。

试验过程及结果都是基于稳定同位素应用假设:即假设1,在水分被根系吸收及向叶片传输过程中不发生同位素分馏;假设2,在水源被根系吸收前,没有经历过显著的同位素分馏;假设3,各潜在水源之间的同位素组成要存在可识别的差异,至少要大于试验误差^[35]。当实际情况不满足上述假设时,试验结果与实际情况可能会存在偏差。对于本研究而言,假设3是成立的,但假设1、2源于方法本身,鉴于氧稳定同位素示踪方法应用的广泛性,本试验结果具有可信度。

此外,虽然本研究只选择了两株胡杨,但却认真地考虑了当地胡杨的生长阶段、群落空间分布特征及可获得的水分条件。本次选择的胡杨植株样本时间上代表了典型的生长季阶段(7月),空间上代表了该研究区河道上游和下游同一时期水文条件差别显著的两株胡杨,样本选择在整体上可以代表整个研究区不同水文条件的胡杨用水对水文条件的响应关系和对不同水源利用的大致比例。但是,不可否认胡杨植株个体之间存在差异性,同时生长季的不同时间对不同水源利用的比重也会发生波动。因此,进一步的工作需要在该研究基础上细化,具体可在这两个样本附近同一时期的胡杨植株中增加样本数量,并将采样时间延长至生长季的其他月份,进一步深化本试验中胡杨用水对水文条件响应的研究结果。

4 结论

额济纳三角洲胡杨水分来源的主要土壤水供给层位受地下水位埋深以及距过水主河道远近的双重影响。对于地下水位埋深较浅(2.0 m)、距离过水河道较近(75 m)的胡杨,其主要土壤水供给层位在1.0~2.0 m范围内;地下水位埋深较深(3.3 m)、距离过水主河道较远(>2 km)的胡杨,其主要土壤水供给层位在1.4~3.2 m范围内。随地下水位埋深增加,吸水的土壤层位也随之变深。

胡杨水分来源(也即主要土壤水供给层位水分来源)受距过水河道远近及过水时间的影响。对于距离过水河道较近(75 m)、河水侧向补给迅速的胡杨,其水分来源中有93.7%为河水,仅6.3%来自地下水,即在含水层停留时间较长的河水;对于距离过水主河道较远(>2 km)、主要受地下水下渗补给的漫灌区,地下水贡献比例达到80.0%,仅有20.0%的水分来自河水。

参考文献(References):

[1] 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,2008,29:709-718.(ZHAO Liang ju, XIAO Hong lang, CHENG Guo dong, et al. A preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2008, 29: 709-718. (in Chinese))

- [2] Ehleringer J R. Annuals and perennials of warm deserts[M]. In: Chabot B F and Mooney H A. Physiological ecology of North American plant communities (eds). New York: Chapman and Hall, 1985: 162-180. DOI: 10.1007/978-94-009-4830-3_7
- [3] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, et al. Convergence across biomes to a common rain use efficiency[J]. Nature, 2004, 429: 651-654. DOI: 10.1038/nature02561
- [4] Filella I, Penuelas J. Partitioning of water and nitrogen in co-occurring Mediterranean woody shrub species of different evolutionary history[J]. Oecologia, 2003, 137: 51-61. DOI: 10.1007/s00442-003-1333-1
- [5] 付爱红,陈亚宁,李卫红.中国黑河下游荒漠河岸林植物群落水分利用策略研究[J].中国科学:地球科学,2014(44):693-705.(FU Aihong, CHEN Yanning, LI Weihong. Water use strategies of the desert riparian forest plant community in the lower reaches of Heihe River Basin, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2014(44): 693-705. (in Chinese))
- [6] 王世绩,陈炳浩,李护群.胡杨林[M].北京:中国环境科学出版社,1995:23-127.(WANG Shirji, CHEN Binghao, LI Huhun. Populus euphratica forest[M]. Beijing: China Environmental Science, 1995: 23-127. (in Chinese))
- [7] 曹德昌,李景文.胡杨种群生殖生态学进展[J].科学技术与工程,2009(9):1202-1209.(CAO Dechang, LI Jingwen. Advance in the research on reproductive ecology of populus euphratica[J]. Science Technology and Engineering, 2009(9): 1202-1209. (in Chinese))
- [8] 冯起,司建华,李建林,等.胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立[J].地球科学进展,2008(23):765-772.(FENG Qi, SI Jianhua, LI Jianlin, et al. Feature of root distribution of populus euphratica and its water uptake model in extreme arid region[J]. Advances in Earth Science, 2008(23): 765-772. (in Chinese))
- [9] Eggemeyer K D, Awada T, Harvey F E, et al. Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees Juniperus virginiana and Pinus ponderosa and two dominant C4 grasses in a semiarid grassland[J]. Tree Physiology, 2009, 29: 157-169. DOI: 10.1093/treephys/tpn019
- [10] Auerswald K, Yang H, Bai Y F, Han X G. Complementarity in water sources among dominant species in typical steppe ecosystems of Inner Mongolia, China[J]. Plant and Soil, 2011, 340: 303-313. DOI: 10.1007/s11104-010-0307-4
- [11] Smith S D, Wellington A B, Nachlinger J L, et al. Functional responses of riparian vegetation to streamflow diversion in the eastern Sierra Nevada[J]. Ecological Application, 1991, 1: 89-97. DOI: 10.2307/1941850
- [12] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water[J]. Nature, 1991, 350: 335-337. DOI: 10.1038/

- 350335a0
- [13] Ehleringer J R, Phillips S L, Schuster W S. Differential utilization of summer rains by desert plants [J]. *Oecologia*, 1991, 88: 430-434. DOI: 10. 1007/ BF00317589
- [14] Li F D, Song X F, Tang C Y, et al. Tracing infiltration and recharge using stable isotope in Taihang Mt., North China [J]. *Environ Geology*, 2007, 53: 687-696. DOI: 10. 1007/ s00254-007-0683-0
- [15] Zhou Y D, Chen S P, Song W M, et al. Water use strategies of two dominant desert plants along a precipitation gradient in northwestern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35: 789-800. DOI: 10. 3724/ SP. J. 1258. 2011. 00789
- [16] 朱亚娟, 卢琦, 吴波, 等. 增雨对巴丹吉林沙漠东南缘白刺水分利用的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013(24): 4† 48. (ZHU Ya juan, LU Qi, WU Bo, et al. Effects of increased precipitation on the water use of *Nitraria tangutorum* at southeast edge of Baddain Jaran Desert in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013(24): 4† 48. (in Chinese)) DOI: 13287/ j. 1001-9332. 2013. 0125
- [17] 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): 285-292. (ZHU Jian jia, CHEN Hui, XING Xing, et al. Quantification analysis of water sources of desert plants in Qaidam Basin: a case study of Golmud plot [J]. *Geographical Research*, 2015(34): 285-292. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/ dlyj201502008
- [18] 张一驰, 于静洁, 乔茂云, 等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究 [J]. *水利学报*, 2011, (42): 757-765. (ZHANG Yi chi, YU Jing jie, QIAO Mao yun, et al. Effects of ecowater transfer on changes of vegetation in the lower Heihe River basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011(42): 757-765. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/ j. cnki. slxb. 2011. 07. 010
- [19] Li Z L, Li Z J, Xu Z X, et al. Temporal variations of reference evapotranspiration in Heihe River basin of China [J]. *Hydrology Research*, 2013, 44(5): 904-916.
- [20] Wang P, Yu J J, Pozdniakov S P, et al. Shallow groundwater dynamics and its driving forces in extremely arid areas: a case study of the lower Heihe River in northwestern China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28: 1539-1553. DOI: 10. 1002/ hyp. 9682
- [21] 徐永亮. 生态输水期间额济纳绿洲区地下水位和水量动态数值模拟 [M]. 北京: 中国科学院大学, 2013. 20-55. (XU Yong liang. Dynamic simulation of groundwater level and storage in Ejina Oasis after ecological water conveyance [M]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. 20-55 (in Chinese))
- [22] 龚家栋, 董光荣, 李森, 等. 黑河下游额济纳绿洲环境退化及综合治理 [J]. *中国沙漠*, 1998(18): 46-52. (GONG Jia dong, DONG Guang rong, LI Sen, et al. Degeneration of physical environment and its control in Ejina Oasis at the lower reaches of Heihe [J]. *Journal of Desert Research*, 1998(18): 46-52 (in Chinese))
- [23] 徐永亮, 于静洁, 张一驰, 等. 生态输水期间额济纳绿洲区地下水动态数值模拟 [J]. *水文地质工程地质*, 2014(41): 11-18. (XU Yong liang, YU Jing jie, ZHANG Yi chi, et al. Groundwater dynamic numerical simulation in the Ejina Oasis in an ecological water conveyance period [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014(41): 1† 18. (in Chinese)) DOI: 10. 16030/ j. cnki. issn. 1000-3665. 2014. 04. 006
- [24] 闵雷雷. 干旱区间歇性河流水渗漏观测与模拟-以额济纳东河为例 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 54-71. (MIN Lei lei. Experimental and numerical study on the river water leakage in an intermittent river in arid area- a case study of Ejina Donghe River [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 54-71. (in Chinese))
- [25] 王平, 于静洁, 闵雷雷, 等. 额济纳绿洲浅层地下水动态监测研究及其进展 [J]. *第四纪研究*, 2014(34): 982-993. (WANG Ping, YU Jing jie, MIN Lei lei, et al. Shallow groundwater regime and its driving forces in the Ejina Oasis [J]. *Quaternary Sciences*, 2014(34): 982-993. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 100† 7410. 2014. 05. 08
- [26] Lin G H, Sternberg L D L. Comparative study of water uptake and photosynthetic gas exchange between scrub and fringe red mangroves, *Rhizophora mangle* L [J]. *Oecologia*, 1992, 90: 399-403. DOI: 10. 1007/ BF00317697
- [27] Horton J L, Hart S C, Kolb T E. Physiological condition and water source use of Sonoran Desert riparian trees at the Bill Williams River, Arizona, USA [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2003, 39: 69-82. DOI: 10. 1080/ 1025601031000096772
- [28] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes [J]. *Plant and Soil*, 2007, 291: 93-107. DOI: 10. 1007/ s11104-006-9177-1
- [29] Meng X J, Wen X F, Zhang X Y, et al. Potential impacts of organic contaminant on $\delta^{18}\text{O}$ and δD in leaf and xylem water detected by isotope ratio infrared spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Eco Agriculture*, 2012, 20: 1359-1365. DOI: 10. 3724/ SP. J. 1011. 2012. 01359
- [30] 刘文茹, 沈业杰, 彭新华, 等. 提取方式对土壤和植物水分提取率的影响及其氢氧同位素分析 [J]. *生态学杂志*, 2012(31): 1870-1875. (LIU Wen ru, SHEN Ye jie, PENG Xin hua, et al. Comparisons of azeotropic and vacuum distillation on water extraction efficiency of soil and plant and stable isotope analysis of extracted water [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012(31): 1870-1875. (in Chinese)) DOI: 10. 13292/ j. 1000-4890. 2012. 0304
- [31] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [J]. *Plant Cell & Environment*, 1992, 15: 1073-1082. DOI: 10. 1111/ j. 1365-3040. 1992. tb01657. x
- [32] 周爱国. 中国西北干旱区额济纳盆地地质生态学研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2004: 81-120. (ZHOU Ai guo. Geology of the Ejina Basin in northwestern arid region, P. R. China [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2004: 8† 120. (in Chinese))

(下转第 172 页)

- mental investigation on high efficiency axial flow pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 38-44.
- [8] 辛华荣, 刘军, 董雷, 等. 大中型泵站肘形进水流道标准化可行性探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 210-213. (XIN Hua rong, LIU Jun, DONG Lei, et al. Discussion of feasibility of standardization for the elbow inlet conduit in large and medium pumping station[J]. South to North Water Transfers and Water Sciences & Technology, 2014, 12(5): 210-213. (in Chinese))
- [9] Li Y J, Wang F J. Numerical investigation of performance of an axial flow pump with inducer[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2007, 19(6): 705-711.
- [10] Li Z F, Wu P, Wu D Z, et al. Experimental and numerical study of transient flow in a centrifugal pump during startup[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(3): 749-757.
- [11] 林鹏, 梁兴, 刘梅清, 等. 基于正交试验的立式混流泵启动参数优化配置[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 12: 97-103. (LIN Peng, LIANG Xing, LIU Meiqing, et al. Optimizing configuration of vertical mixed flow pump startup parameters based on orthogonal test[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(12): 97-103. (in Chinese))
- [12] Wu D Z, Wu P, Li Z F, et al. The transient flow in a centrifugal pump during the discharge valve rapid opening process[J]. Nuclear Engineering and Design, 240 (2010): 4061-4068.
- [13] Zhang D S, Shi W D, Chen B, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2010, 22(1): 35-44.
- [14] 李文锋, 冯建军, 罗兴铸, 等. 基于动网格技术的混流式水轮机叶轮内部瞬态流动数值模拟[J]. 水力发电学报, 2015(7): 64-73. (LI Wenfeng, FENG Jianjun, LUO Xingqi, et al. Numerical simulation of transient flows in Francis turbine runner based on dynamic mesh method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015(7): 64-73. (in Chinese))
- [15] 刘华坪, 陈浮, 马波. 基于动网格与 UDF 技术的阀门流场数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2008(2): 106-108. (LIU Huaping, CHEN Fu, MA Bo, Numerical simulation of flow field in the valve based on the moving mesh and the UDF[J]. Turbine Technology, 2008(2): 106-108. (in Chinese))
- [16] 华哗, 廖伟丽. CFD 技术在管道阀门水击计算中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(3): 72-75 (HU A Ye, LIAO Weili. Application of CFD method in calculation of water hammer for pipe valve[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(3): 72-75. (in Chinese))
- [17] 王福军. 计算流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Furjun. Computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [18] 童亮, 余罡, 彭政, 等. 基于 VOF 模型与动网格技术的两相流耦合模拟[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2008, 30(4): 525-528. (TONG Liang, YU Gang, PENG Zheng, et al. Coupled simulation of two phase flow based on VOF model and dynamic mesh technology[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2008, 30(4): 525-528. (in Chinese))
- [19] 周大庆, 张蓝国. 抽水蓄能电站泵工况断电过渡过程数值试验[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014(2): 16-20. (ZHOU Daqing, ZHANG Languo. Numerical experiments in power off transient process of pumped storage power station under pump condition[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014(2): 16-20. (in Chinese))
- [20] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (LIU Chao. Pump and pumping station[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))

(上接第 94 页)

- [33] Min L L, Yu J J, Liu C M, et al. The spatial variability of streambed vertical hydraulic conductivity in an intermittent river, northwestern China [J]. Environment Earth Science, 2013, 69: 873-883. DOI: 10.1007/s12665-012-1973-8
- [34] Zhu Y H, Ren L L, Skaggs T H, et al. Simulation of Populus euphratica root uptake of groundwater in an arid woodland of the Ejina Basin, China[J]. Hydrological Processes, 2009, 23: 2460-2469. DOI: 10.1002/hyp.7353
- [35] Brunel J P, Walker G R, Dighton J C, et al. Use of stable isotopes of water to determine the origin of water used by the vegetation and to partition evapotranspiration. A case study from HAPEX-Sahel[J]. Journal of Hydrology, 1997, 188: 466-481. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03188-5