

# 准噶尔盆地东南缘多枝怪柳、白刺和红砂水分来源的异同

周 海<sup>1,2\*</sup> 郑新军<sup>1\*\*</sup> 唐立松<sup>1</sup> 李 彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站, 乌鲁木齐 830011; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘 要** 荒漠生态系统中, 水是植物生长最主要的限制因子。为了比较同一生境下不同荒漠植物的水分来源特征, 选取了同一生境下的多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、白刺(*Nitraria sibirica*)和红砂(*Reaumuria soongorica*), 测定了这3种植物茎水和各潜在水源(降水、土壤水和地下水)的氢、氧稳定同位素比率( $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ )值, 并利用IsoSource软件计算了3种植物对潜在水源的利用比例。结果表明: 红砂和白刺的茎水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值及其水分来源有明显的季节波动特征。其中, 红砂为浅根系植物, 春季(3–5月)以表层土壤水为主要水源, 夏秋季节(6–10月)表层土壤含水量显著降低, 其主要的水分来源逐渐偏向于较深层的土壤水; 白刺的根系分布范围介于红砂和多枝怪柳之间, 在春季能够较多地利用表层土壤水, 而到了夏秋季节, 所利用的水分更多地来源于深层土壤水或地下水; 多枝怪柳为深根系植物, 其90%以上的水分来源于深层土壤水和地下水, 而且茎水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值及其水分来源没有季节波动特征。3种植物水分来源特征的差异与其水分利用策略密切相关, 同时, 也说明荒漠灌木可以通过自身调节向着最优(最有利)表现型发展, 从而最大限度地获取水分。

**关键词** 荒漠植物, IsoSource模型, 稳定同位素, 水分来源

## Differences and similarities between water sources of *Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica* in the southeastern Junggar Basin

ZHOU Hai<sup>1,2\*</sup>, ZHENG Xin-Jun<sup>1\*\*</sup>, TANG Li-Song<sup>1</sup>, and LI Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fukang Desert Ecosystem Observation and Experiment Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; and <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Aims** Water is the most important limiting factor for plant growth in desert ecosystems. Our objective was to investigate the water sources of three co-existing desert plants and illustrate seasonal variation characteristics in southeastern Junggar Desert in China.

**Methods** We investigated three kinds of desert plants (*Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica*) in the same habitat and measured hydrogen and oxygen stable isotope ratio ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) values of their xylem water and potential water sources (precipitation, soil moisture and ground water). The IsoSource model was then used to calculate probable contributions of potential water sources to total plant water uptake.

**Important findings** The water sources of the three desert plants had obvious seasonal characteristics. *Reaumuria soongorica* and *N. tangutorum* obtained a high proportion of water from shallow soil water (0–100 cm) in spring. However, during the summer and autumn, *R. soongorica* tended to use deeper soil water, and *N. tangutorum* tended to use ground water. *Tamarix ramosissima* obtained 90% of its water from deep soil water and ground water, and there were no seasonal variations. The three kinds of plants had different water sources closely related to their water use strategies. This shows desert shrubs, through self-regulation, could tend to their optimal phenotypes and maximize water uptake.

**Key words** desert plant, IsoSource model, stable isotope, water source

在干旱半干旱地区, 水是生态系统过程(CO<sub>2</sub>的固定、植物生长、呼吸作用等)和功能(净初级生产

力(NPP))最主要的限制因子(Raich *et al.*, 1991; Haase *et al.*, 1999; Dube & Pickup, 2001), 降水和地

收稿日期Received: 2013-01-05 接受日期Accepted: 2013-04-01

\* E-mail: zhouhai1201@126.com

\*\* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: zhengxj@ms.xjb.ac.cn)

下水是该类区域主要的水源(Dawson & Ehleringer, 1991; Cheng *et al.*, 2006)。虽然干旱半干旱地区降水偏少,但每一次降水所引起的短期水资源富集在一定程度上对植物的生长具有重要的作用(Schwinnig & Sala, 2001)。Ehleringer和Dawson (1992)对干旱环境下植物水分来源进行了研究,发现多年生深根系植物通过吸收深层土壤水或地下水维持生存,而一年生植物大多发育浅根系,通过表层土壤利用短暂的降水;还发现有些物种通过水分利用的季节性变化来避免竞争的现象。植物吸收和利用水分的模式决定了生态系统对环境水分的响应(Ewe *et al.*, 1999),其中,荒漠灌木对环境水分变化的响应与其水分利用策略紧密相关(Xu & Li, 2006)。植物中的H和O这两种元素主要来自于其吸收的水分(Alessio *et al.*, 2004),且用氢氧稳定同位素技术研究植物体内水分来源具有精确度高、破坏性小等优点,因而,该技术在探寻干旱半干旱区植物水分来源的研究中应用广泛(Eggemeyer *et al.*, 2009)。

植物所能利用的水分主要来自于降水、径流、土壤水和地下水,而土壤水、径流和地下水最初也来自降水,降水中氢氧稳定同位素的组成存在季节性差异,且水分在运移或相态转化过程中会发生同位素分馏作用(Dawson & Ehleringer, 1991),表层土壤水由于蒸发而发生氢氧同位素的分馏作用,因此可能比下层土壤水更富集重同位素,即土壤剖面中不同层次的土壤水稳定氢氧同位素组成会存在显著差异(Allison & Leaney, 1982; Tang & Feng, 2001),因而,植物潜在水源的氢氧稳定同位素组成也存在差异。植物根系吸收的水分,通过茎木质部运输到未栓化的幼嫩枝条或者叶片之前一般不发生氢氧同位素分馏现象(Ehleringer & Dawson, 1992; Dawson *et al.*, 2002),所以通过比较植物茎水和潜在水源的氢氧同位素值,采用一般线性混合模型(linear mixing model) (White *et al.*, 1985)或IsoSource模型(Phillips & Gregg, 2003; Phillips *et al.*, 2005)就可以计算出植物对各潜在水源的利用比例。然而,Ellsworth和Williams (2007)研究发现旱生植物和盐生植物的根系在吸收水分的时候氢同位素会发生分馏作用,因此本文仅采用氧同位素值,通过IsoSource模型来计算荒漠植物对各潜在水源的利用比例。

多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、白刺(*Nitraria sibirica*)和红砂(*Reaumuria soongorica*)是干旱区常

见的盐生、旱生荒漠植物。这3种植物在准噶尔盆地东南缘的绿洲-荒漠交错带广泛分布,形成了以它们为建群种或优势种的荒漠植物群落,对区域生态系统有着决定性的影响。以往对它们的研究多集中在形态解剖、根系的形态和功能、对极端环境的适应性及群落功能等方面(孙祥和于卓, 1992; 杨自辉和高志海2000; 弋良朋等, 2007; 柴成武等, 2009; Xu & Li, 2009),但是对荒漠灌木的水分来源及其季节变化特征的研究较少。本文选择在准噶尔盆地东南缘的阜康荒漠生态研究站设立研究样地,测定多枝怪柳、白刺和红砂茎水及其潜在水源(降水、土壤水和地下水)的H、O稳定同位素比率( $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ )值,对比分析3种荒漠植物水分来源的差异以及季节变化特征,以期初步阐明这3种荒漠植物的水分来源及其对干旱生境的适应机制。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况和样地描述

研究区位于天山博格达峰北麓,地处中纬度欧亚大陆腹地,87°6' E, 44°7' N, 海拔475 m。该地属于典型温带荒漠大陆性气候,年日照总量可达2 532.5 h。四季分明,夏季炎热干燥,冬季寒冷,春秋气温升降强烈。年平均气温6.6 °C,最高气温42.6 °C,最低气温-41.6 °C,1月和7月平均气温分别为-17和25.6 °C;降水稀少且时空分布不均,多年平均值只有168.4 mm,年蒸发量可达1 800 mm以上。地下潜水水位约为5 m,土壤类型为盐化灰漠土或龟裂状灰漠土。年降水量少及蒸腾剧烈,造成该区域极度干旱,生态条件恶劣。植被总特点是:组成简单、类型单调、群落郁闭度很低、分布稀疏,主要有以怪柳属(*Tamarix*)植物为建群种的盐生灌木群落,植被高度在1.2–2.1 m之间,植被盖度约为15%,在灌丛下方或间隙零星生长有小半灌木红砂、白刺、同齿樟味藜(*Camphorosma monspeliaca*)及一年生草本植物紫翅猪毛菜(*Salsola affinis*)和囊果碱蓬(*Suaeda physophora*)等。

### 1.2 试验设计和样本描述

#### 1.2.1 样品采集

2012年3月27–10月19日在准噶尔盆地东南缘新疆阜康荒漠生态研究站选取3种广泛分布的物种:多枝怪柳、白刺和红砂,其形态特征如表1所示。在植物的生长季,每种植物选取4株形态特征相近的

表1 多枝怪柳、白刺和红砂灌丛的形态特征

Table 1 Morphological characteristics of *Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica*

	高度 Height (cm)	冠幅 Crown diameter (cm)	根深 Root depth (cm)	总吸收根表面积 Total surface area of absorbing roots (cm <sup>2</sup> )
多枝怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	175.0 ± 13.4	155.0 ± 17.2	≥310	30 249.2 ± 34.3
白刺 <i>Nitraria sibirica</i>	78.3 ± 5.8	328.6 ± 18.36	≥200	10 622.1 ± 26.4
红砂 <i>Reaumuria soongorica</i>	55.0 ± 8.2	35.0 ± 5.6	80.0 ± 25.7	361.8 ± 19.7

植株, 在每月月初和中旬分别取样一次, 每株每次取1个样。采样方法: 剪取非绿色的栓化小枝(直径0.3–0.5 cm, 长3–5 cm), 迅速去皮后装入采样瓶并用封口膜密封, 然后放入随身携带的冰盒中, 带回实验室后冷冻保存。

在每株植物下方用土钻取0–300 cm的土壤样品, 在0–100 cm范围内每10 cm取样一次, 100–300 cm每20 cm取样一次, 每次取两份样品, 将一份土壤样品迅速装入样品瓶, 用封口膜密封, 并放入携带的冰盒, 带回实验室冷冻保存, 另外一份土壤样品装入铝盒, 带回实验室用烘干法测土壤含水量。收集实验期间的降水, 每月在距实验样地最近的实验井中取地下水样品, 将所取样品迅速装入样品瓶、用封口膜密封, 并放入携带的冰盒, 带回实验室2 °C冷藏。

### 1.2.2 样品测定

在中国科学院阜康荒漠生态系统研究站进行样品测定, 先用低温真空抽提法抽提植物茎秆样品和土壤样品中的水分, 抽提出的水分放在玻璃样品瓶中密封, 并低温保存(2 °C), 然后用液态水同位素分析仪(DLT-100, Los Gatos Research Inc., Mountain View, USA)测量土壤水H、O稳定同位素比率:

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

式中 $R_{\text{sample}}$ 是样品中元素的重轻同位素丰度之比, 如(D/H)<sub>sample</sub>, (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O)<sub>sample</sub>,  $R_{\text{standard}}$ 是国际通用标准物(H、O稳定同位素采用v-SMOW)稳定同位素丰度之比, 如(D/H)<sub>standard</sub>和(<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O)<sub>standard</sub>。

### 1.2.3 IsoSource模型

Phillips和Gregg (2003)对潜在水源超过3个时提出了确定各潜在水源贡献比例上、下限的IsoSource模型。初步判断植物的水分来源后, 将植物木质部水和各潜在水源的同位素值代入IsoSource模型 (<http://www.epa.gov/wed/pages/models/stableIsotops/isosource/isosource.htm>), 计算植物对

各水源的利用比例。运行模型之前, 需要设定两个参数: 其一是来源增量, 一般设为1%, 表示以1%的增量赋值植物对各水源的利用比例, 用以检测可能的比例组合; 其二是质量平衡公差, 设为0.1‰, 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同位素值的差异不超过0.1‰时, 比例组合被认为是可能的组合。质量平衡公差一般不小于来源增量与各可能水源同位素值之间最大差值的乘积的1/2。

### 1.2.4 数据统计和分析

采用SPSS 17.0对实验数据进行分析, 运用最小显著差数(LSD)法对数据进行多重比较, 在0.05水平上检验其显著性。用Origin 8.0进行图表绘制。

## 2 结果

### 2.1 降水及其稳定同位素特征

在观测期间(2月22日–10月17日), 研究区的总降水量仅为85.5 mm, 降水分布不均(图1B), 其中6月和7月降水最少, 仅为1.9 mm和10.5 mm。由降水氢氧稳定同位素值通过回归分析得出的区域大气降水线方程(LMWL):  $\delta D_{\text{LMWL}} = 7.691\delta^{18}\text{O}_{\text{LMWL}} + 1.464$  ( $F = 838.733, p < 0.01$ ) (图1A), 与全球大气降水线方程(GMWL) (Craig, 1961):  $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 相比, 斜率和截距明显偏小, 且降水的稳定同位素值基本都位于大气降水线右侧, 表明该区域的降水过程中稳定同位素值受到了二次蒸发的影响。降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围较大, 介于–22.78‰ – 1.67‰之间, 且表现出了显著的季节变化特征(图1B), 冬春季节(2月22日)  $\delta^{18}\text{O}$ 值最小(–22.78‰), 夏末秋初(8月12日)达到最大值(1.67‰)。

### 2.2 土壤水稳定同位素特征

图2给出了研究区从表层到300 cm不同深度、不同季节的土壤含水量和土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化趋势。0–50 cm土层中的土壤含水量和土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出显著的季节效应: 春季(3–5月)土壤含水量较

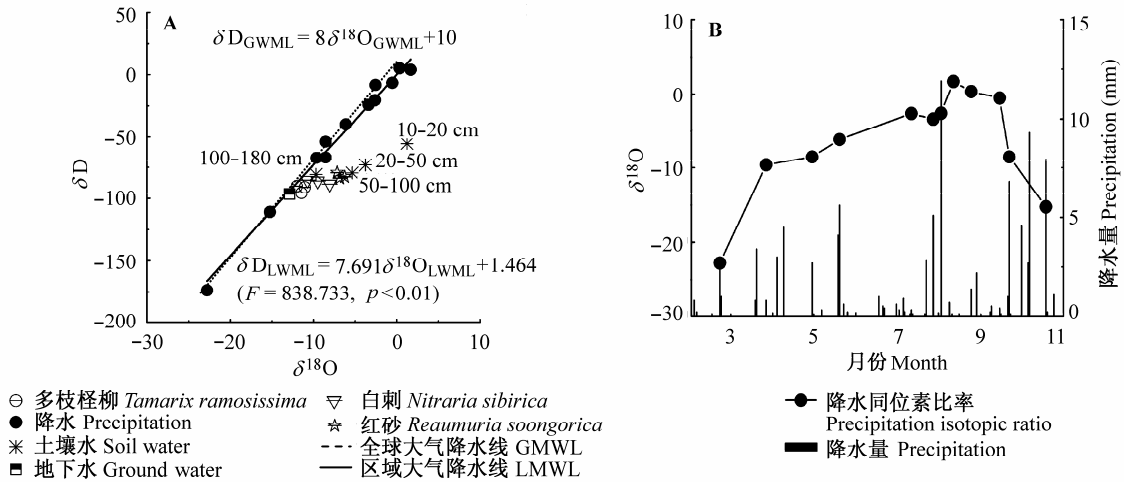


图1 准噶尔盆地东南缘大气降水线以及植物茎水、土壤水和地下水氢、氮稳定同位素比率( $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ )值分布特征(A)、降水量的分布以及降水 $\delta^{18}O$ 值季节变化特征(B)。

Fig. 1 Local meteoric water line and distribution characteristics of hydrogen and oxygen stable isotope ratio ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) values of stem water, soil water and groundwater (A), and precipitation distribution and the seasonal variations of  $\delta^{18}O$  value of precipitation (B) in southeast of the Junggar Desert. GMWL, global meteoric water line; LMWL, local meteoric water line.

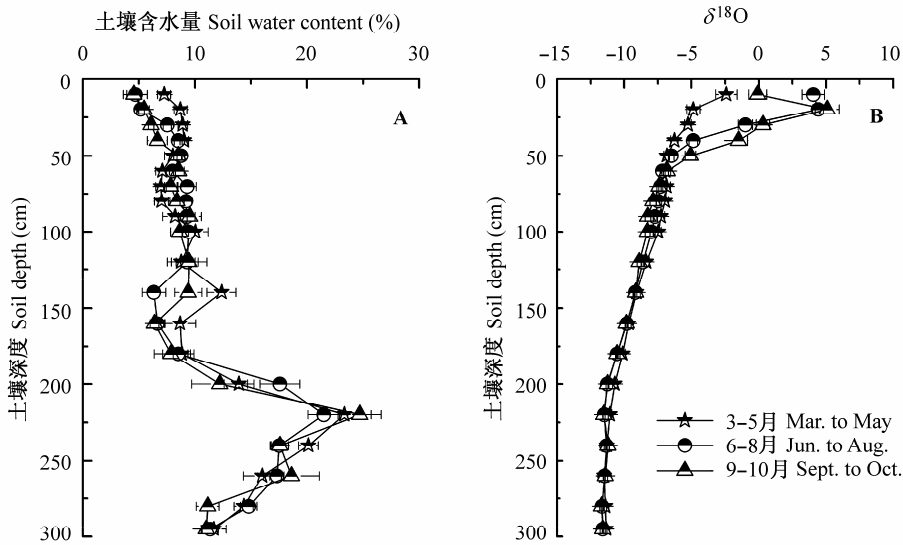


图2 准噶尔盆地东南缘不同深度土壤含水量(A)、土壤水氧稳定同位素比率( $\delta^{18}O$ )值(B)的变化(平均值±标准误差,  $n = 4$ )。

Fig. 2 Variations of water content (A) and oxygen stable isotope ratio ( $\delta^{18}O$ ) value in soil water (B) with different soil depth in southeast of the Junggar Desert (mean  $\pm$  SE,  $n = 4$ ).

高, 各层差异较小, 平均值为8.49%, 土壤水 $\delta^{18}O$ 平均值为-5.24‰, 该层水分差异较小的原因是冰雪融水对土壤水分的充分补给; 夏季(6-8月)因为降水稀少, 蒸发剧烈, 0-50 cm各层土壤含水量明显减小, 随着土壤深度的增加显著增大, 其土壤水 $\delta^{18}O$ 平均值为-1.52‰, 随着土壤深度的增加显著减小, 表明夏季剧烈的蒸发使得各层土壤中不同程度地

富集 $^{18}O$ 同位素; 秋季(9-10月)土壤含水量与夏季相比变化较小, 但是0-10 cm土壤水 $\delta^{18}O$ 值却显著减小, 而20 cm以下各层的土壤水 $\delta^{18}O$ 值与夏季基本一致。

土壤含水量随着土壤深度变化显著, 在200-250 cm处存在明显的峰值区(图2A), 该峰值区主要由地下水毛细管上升作用形成(Xu & Li, 2009)。土

壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 在小于50 cm的土层中表现出了明显的季节差异, 其余各层季节差异不显著, 0–180 cm的土层中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着深度的增加而逐渐减小, 180–300 cm的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值各层变化较小(图2B)。运用最小显著差数法(LSD法)多重比较分析得出: 50–100 cm各层之间的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异不显著( $0.08 < p < 0.504$ ); 100–180 cm差异不显著( $0.05 < p < 0.065$ ), 180–300 cm差异不显著( $0.097 < p < 0.832$ ); 其余各层之间差异显著( $p < 0.05$ )。

地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在年内基本没有变化, 与深层(180–300 cm)土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异不显著( $p = 0.51$ ), 而与其余各层差异显著( $p < 0.05$ ), 表明地下水以毛细上升的形式补充深层的土壤水。

### 2.3 植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

3种荒漠植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值都位于全球大气降水线(GMWL)和区域大气降水线(LWML)右侧区域(图1A), 说明这些植物所利用的水源受到了蒸发作用的影响, 使氢氧同位素发生分馏而富集重同位素。对3种植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值比较分析得出: 红砂木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值( $-9.01\text{‰} - -3.98\text{‰}$ )在20–180 cm的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值( $-9.15\text{‰} - -0.25\text{‰}$ )之间, 且显著大于白刺( $p < 0.01$ )和多枝柽柳( $p < 0.01$ ); 白刺木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值( $-11.46\text{‰} - -7.02\text{‰}$ )在20–300 cm的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值( $-12.06\text{‰} - -0.25\text{‰}$ )之间, 显著大于多枝柽柳( $p = 0.008$ ); 多枝柽柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值( $-11.93\text{‰} - -10.83\text{‰}$ )最小, 接近于地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

3种植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出了不同的季节变化趋势(图3)。红砂在整个生长季中木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动幅度较大, 但是基本保持在0–180 cm的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围之内, 表明红砂在整个生长季的水分可能来源于0–180 cm范围内的土壤水, 且受到土壤水分在年内变化的影响, 使其在整个生长季的变化幅度较大; 白刺木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在6–8月接近于地下水, 而在3–5月和9–10月介于0–180 cm的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间。表明白刺在不同的季节所利用的水源不同, 3–5月和9–10月以较浅的土壤水为主要来源, 而在6–8月主要以深层土壤水或地下水为主; 多枝柽柳在整个生长季木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本不变, 保持在180 cm到地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围之内, 表明多枝柽柳的水分来源稳定, 可能主要以深层土壤水和地下水为主要的来源。表明这3种植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在较大差异, 其原因可能是它们

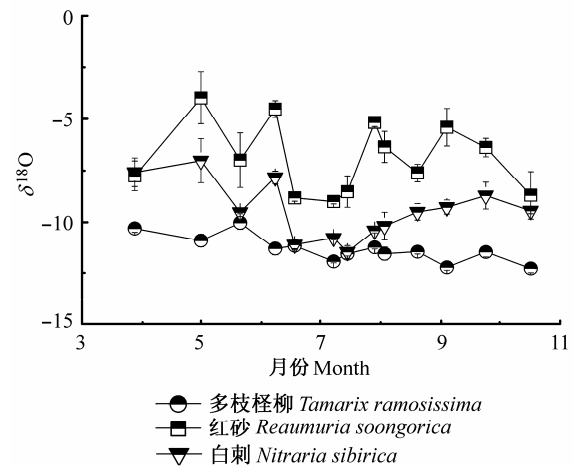


图3 3种荒漠植物(多枝柽柳、白刺和红砂)茎水氧稳定同位素比率( $\delta^{18}\text{O}$ )值的变化(平均值 $\pm$ 标准误差,  $n = 4$ )。

Fig. 3 variations of oxygen stable isotope ratio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) value of stem water of three desert plants (*Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica*, *Reaumuria soongorica*) (mean  $\pm$  SE,  $n = 4$ ).

的水分来源不同, 红砂的吸水范围可能仅限于小于180 cm的土层范围内, 白刺的吸水范围可能从表层土壤水延伸到深层土壤水, 甚至可以吸取地下水, 而多枝柽柳的吸水范围可能仅限于深层土壤水或地下水。

### 2.4 植物对各潜在水源的利用比例

红砂在整个生长季中水分主要来源于小于100 cm范围内的土壤水, 但是不同的季节利用土壤水的比例不同(3–5月: 78.8%; 6–8月: 69.2%; 9–10月: 47.1%), 随着季节的变化, 对100 cm以内的土壤水的利用比例逐渐减小, 其中对表层土壤水(0–20 cm和20–50 cm)的利用比例由3–5月的35.5%和25.7%下降到9–10月的9.6%和12.9%, 而对100–180 cm土壤水和地下水的利用比例由3–5月的12.6%和8.5%增加到9–10月的26.5%和25.3%, 表明红砂随着季节的变化逐渐地增加了对100–180 cm土壤水分和地下水的利用比例; 白刺在3–5月50%的水分来源于小于100 cm范围内的土壤水, 而在6–8月份仅有15.5%的水分来源于小于100 cm的土壤水, 尤其是对0–20 cm、20–50 cm和50–100 cm范围内的土壤水的利用比例由3–5月的11.0%、16.8%和21.7%, 减小到了2.2%、4.3%和9.0%, 而对深层土壤水或地下水的利用比例由23.5%增加到了64.4%, 在9–10月白刺对小于100 cm的土壤水利用上升到了32.6%, 而对地下水的利用比例下降到了45.5%, 表明白刺的水

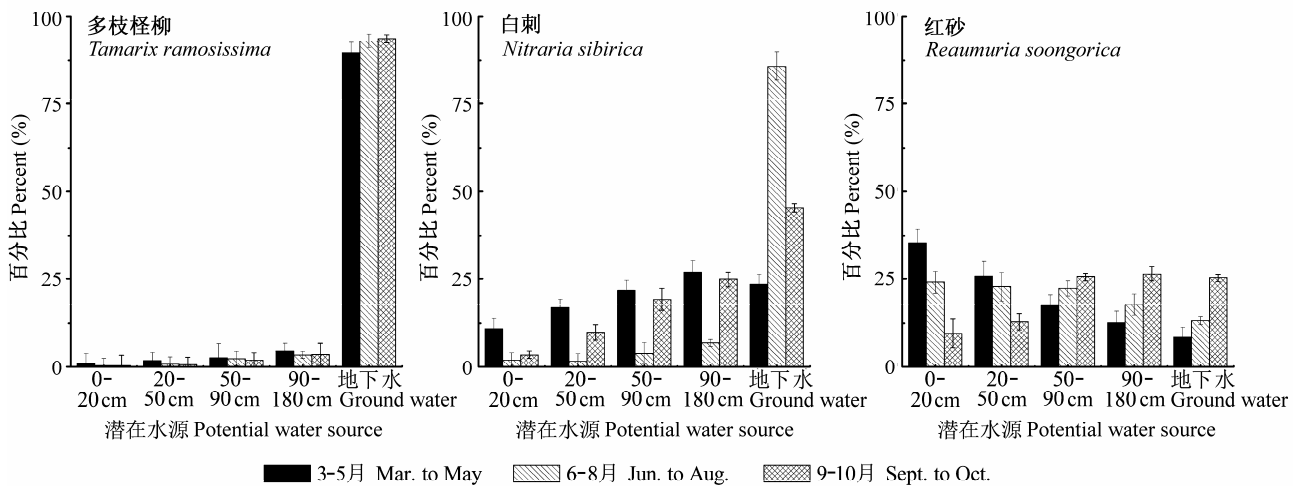


图4 3种荒漠植物(多枝桉柳、白刺和红砂)对各潜在水源的利用比例(平均值±标准误差,  $n = 4$ )。

Fig. 4 Proportion of potential water source for three desert plants (*Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica*) (mean ± SE,  $n = 4$ ).

分来源随着季节的变化而变化;多枝桉柳在整个生长季中90%以上的水分来源于深层土壤水和地下水,且基本稳定不变,表明多枝桉柳的水分来源稳定,基本不受土壤水分变化的影响(图4)。

### 3 讨论

#### 3.1 植物潜在水源特征分析

植物所能利用的水分主要来自降水、土壤水和地下水(Ehleringer *et al.*, 1992; Alessio *et al.*, 2004),而土壤水和地下水最初也来自降水(Dawson & Ehleringer, 1991)。本研究中观测到的大气降水有明显的季节差异,春秋降雨偏多,而夏季降雨偏少。降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值也表现出了明显的季节变化特征,冬春季节较小,夏末秋初达到最大值,8月中旬开始逐渐减小。其原因是冬季水汽源于北冰洋高纬度地区,因此降雪的稳定同位素值较低(王宝鉴等, 2006; 柳鉴容等, 2008)。夏季降水稳定同位素值偏高,这与全球范围内陆高温干旱区冬季降水中重同位素普遍富集的结果相一致(章新平等, 2006)。

根据土壤含水量的差异可以将土壤在垂直方向上分为四层:干沙层、水分活跃层、水分次活跃层和水分相对稳定层(王孟本和李洪建, 1995; 陈海滨等, 2003; 格日乐等, 2006)。本研究运用多重比较(LSD)法分析各层土壤水H、O稳定同位素值,根据各层之间差异的显著性进行分层,其结果与以上结论相一致,干沙层可达到20 cm左右,含水量受降水

和蒸发的作用较大;水分活跃层在干沙层之下,易受上层土壤水分变化的影响,季节变化明显;水分次活跃层的土壤含水量易受大降水事件的影响,而小降水事件对其影响较小;水分相对稳定层不易受地面气象要素的影响,稳定性较好。表层土壤水稳定同位素值随降水的变化表现出了明显的季节性差异(图2),3–5月土壤水分受到冰雪融水的补给,含水量较高,而稳定同位素值偏小;6–8月降水稀少、蒸发强烈,表层土壤大量富集重同位素,稳定同位素值达到最大值,到了9–10月随着降水增多、降水中稳定同位素值减小,土壤水稳定同位素值也逐渐减小。这一变化过程与Saxena (1984)研究发现的季节降水分布与表层土壤水稳定同位素值有极高的变异性相一致。土壤水稳定同位素受到蒸发分馏作用的影响(Barnes & Allison, 1984),且随土壤深度的增加,蒸发效应迅速减小(Barnes & Allison, 1988),因此,随深度的变化土壤水稳定同位素值不同。本研究中小于200 cm的土壤水稳定同位素值表现出了逐层递减的趋势(图2),200–300 cm与地下水稳定同位素值差异不显著,即表层土壤水的稳定同位素值显著大于下层,且随着深度增加土壤水稳定同位素值越接近地下水。

#### 3.2 3种荒漠植物的水分来源比较分析

同一生境下的多枝桉柳、白刺和红砂具有相同的潜在水源,而它们主要的水分来源存在差异(图3)。3种植物有不同的根系分布特征,红砂为浅根植

物, 吸收根主要分布范围为0–80 cm, 其中93%分布在0–50 cm土层范围内(弋良朋等, 2007; Xu & Li, 2009); 多枝怪柳为深根植物, 吸收根分布范围在地下50–310 cm, 占吸收根表面积70%的吸收根分布在200–300 cm土层内; 白刺根系分布有多枝怪柳和红砂之间, 吸收根分布于0–200 cm的土层内, 其中69%分布于0–50 cm的土层(孙祥等和于卓, 1992; 柴成武等, 2009), 多枝怪柳和白刺的根系能够达到地下水所能补给的土壤水稳定层(表1)。分布在表层土壤中的根能够吸收降水补充的土壤水, 而在深层土壤中的根吸收的是由冬春季节的降水或者地下水补充的土壤水(Chimner & Cooper, 2004)。在干旱气候条件下表层土壤中的根可能处于休眠状态, 植物只能依赖深根从土壤中吸收水分(Ehleringer & Dawson, 1992; Flanagan *et al.*, 1992), 当降水增加, 激活表层休眠的根系时, 植物就会增加对浅层土壤水的利用(Williams & Ehleringer, 2000; Duan *et al.*, 2008)。本研究中, 红砂和白刺的大量吸收根分布在浅层土壤中, 而多枝怪柳的吸收根主要分布在深层土壤中。春季(3–5月)冰雪融水较多补给了表层土壤水, 红砂和白刺分别约60%和30%的水分来自0–50 cm的土壤水。到了夏秋季节, 降水偏少, 表层土壤含水量极小, 红砂对表层土壤水的利用急剧减少, 转而主要利用更深层次的土壤水, 而白刺80%以上的水分来自深层土壤水和地下水, 9–10月虽然降水增大, 但是并没有完全解除表层土壤中植物根系的休眠, 红砂和白刺仍然不能以表层土壤水为主要来源。多枝怪柳的吸收根分布于深层土壤中, 其90%的水分来源于深层土壤水和地下水, 因此, 在多枝怪柳的整个生长季中, 水分来源稳定, 基本没有变化。

#### 4 结论

同一生境下的3种荒漠灌木, 在其生长季中表现出了不同的水分来源特征。红砂属于浅根系植物, 其水分主要来源于100 cm以内的土壤水, 且随着季节的变化以及干旱程度的加剧, 水分来源逐渐倾向更深层的土壤水; 多枝怪柳属于深根系植物, 其90%以上的水分来源于深层土壤水和地下水, 基本不受土壤水分变化的影响; 白刺根系分布在红砂和多枝怪柳之间, 在土壤水充足的春季, 主要以表层土壤水为主要来源, 而到了干旱的夏秋季节, 主

要以深层土壤水和地下水为主要水分来源。以上结果表明: 同生境下的荒漠植物水分来源差异显著, 这与它们在干旱胁迫条件下的水分利用策略密切相关, 在水分极其缺乏的荒漠生态系统中, 植物可以通过自身调节向着最优(最有利)表现型发展, 从而最大程度地获取水分。

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(2009-CB-825102)、国家自然科学基金(41171049)和中国科学院西部之光项目(XBBS201001)。

#### 参考文献

- Alessio GA, de Lillis M, Brugnoli E, Lauteri M (2004). Water sources and water-use efficiency in Mediterranean coastal dune vegetation. *Plant Biology (Stuttgart)*, 6, 350–357.
- Allison GB, Leaney FW (1982). Estimation of isotopic exchange parameters, using constant-feed pans. *Journal of Hydrology*, 55, 151–161.
- Barnes CJ, Allison GB (1984). The distribution of deuterium and  $^{18}\text{O}$  in dry soils: 3. Theory for non-isothermal water movement. *Journal of Hydrology*, 74, 119–135.
- Barnes CJ, Allison GB(1988). Water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Journal of Hydrology*, 100, 143–176.
- Chai CW, Xu XY, Tang WD, Wang FL, Wang L (2009). Root system of the main sand fixing plants in desert zone of Shiyanghe river basin. *Journal of Northwest Forestry University*, 24(4), 21–26. (in Chinese with English abstract) [柴成武, 徐先英, 唐卫东, 王方琳, 王龙 (2009). 石羊河流域荒漠区主要固沙植物根系研究. 西北林学院学报, 24(4), 21–26.]
- Chen HB, Sun CZ, An F, Dang KL (2003). A study on forest soil water features of Loess Plateau gully and hilly region(I)-vertical and seasonal variation of soil water. *Journal of Northwest Forestry University*, 18(4), 13–16. (in Chinese with English abstract) [陈海滨, 孙长忠, 安锋, 党坤良 (2003). 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(I)——土壤水分的垂直变化和季节变化特征. 西北林学院学报, 18(4), 13–16.]
- Cheng XL, An SQ, Li B, Chen JQ, Lin GH, Liu YH, Luo YQ, Liu SR (2006). Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in northwestern China. *Plant Ecology*, 184, 1–12.
- Chimner RA, Cooper DJ (2004). Using stable oxygen isotopes to quantify the water source used for transpiration by native shrubs in the San Luis Valley, Colorado U.S.A. *Plant and Soil*, 260, 225–236.

- Craig H (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702–1703.
- Dawson TE, Ehleringer JR (1991). Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 350, 335–337.
- Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, Templer PH, Tu KP (2002). Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 507–559.
- Duan DY, Ouyang H, Song MH, Hu QW (2008). Water sources of dominant species in three alpine ecosystems on the Tibetan Plateau, China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50, 257–264.
- Dube OP, Pickup G (2001). Effects of rainfall variability and communal and semi-commercial grazing on land cover in southern African rangelands. *Climate Research*, 17, 195–208.
- Eggemeyer KD, Awada T, Harvey FE, Wedin DA, Zhou XH, Zanner CW (2009). Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* and two dominant C<sub>4</sub> grasses in a semi-arid grassland. *Tree Physiology*, 29, 157–169.
- Ehleringer JR, Dawson TE (1992). Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 15, 1073–1082.
- Ehleringer JR, Phillips SL, Comstock JP (1992). Seasonal variation in the carbon isotopic composition of desert plants. *Functional Ecology*, 6, 396–404.
- Ellsworth PZ, Williams DG (2007). Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant and Soil*, 291, 93–107.
- Ewe SML, Sternberg LSL, Busch DE (1999). Water-use patterns of woody species in pineland and hammock communities of South Florida. *Forest Ecology and Management*, 118, 139–148.
- Flanagan LB, Ehleringer JR, Marshall JD (1992). Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell & Environment*, 15, 831–836.
- Gerile, Zhang L, Liu J, Ning RX, Wuren TD, Gao Y (2006). Soil moisture dynamic rule of artificial *Haloxylon ammodendron* forest in Kubuqi Desert. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(6), 173–177. (in Chinese) [格日乐, 张力, 刘军, 宁瑞些, 乌仁陶德, 高岩 (2006). 库布齐沙漠人工梭梭林地土壤水分动态规律的研究. 干旱区资源与环境, 20(6), 173–177.]
- Liu JR, Song XF, Yuan GF, Sun XM, Liu X, Chen F, Wang ZM, Wang SQ (2008). Characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over northwest China and its water vapor sources. *Acta Geographica Sinica*, 63, 12–22. (in Chinese with English abstract) [柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 孙晓敏, 刘鑫, 陈锋, 王志民, 王仕琴 (2008). 西北地区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的特征及水汽来源. 地理学报, 63, 12–22.]
- Phillips DL, Gregg JW (2003). Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 136, 261–269.
- Phillips DL, Newsome SD, Gregg JW (2005). Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods. *Oecologia*, 144, 520–527.
- Raich JW, Rastetter EB, Melillo JM, Kicklighter DW, Steudler PA, Peterson BJ, Grace AL, Moore B III, Vorosmarty CJ (1991). Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecological Applications*, 1, 399–429.
- Saxena RK (1984). Seasonal variations of oxygen-18 in soil moisture and estimation of recharge in esker and moraine formations. *Nordic Hydrology*, 15, 235–242.
- Schwinning S, Sala OE (2004). Hierarchy of responses to resource pulses in and semiarid ecosystem. *Oecologia*, 141, 211–220.
- Sun X, Yu Z (1992). A study on root system of *Nitraria tangutorum*. *Journal of Desert Research*, 12(4), 50–54. (in Chinese with English abstract) [孙祥, 于卓 (1992). 白刺根系的研究. 中国沙漠, 12(4), 50–54.]
- Tang K, Feng XH (2001). The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water. *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 355–367.
- Wang BJ, Huang YX, Tao JH, Li DL, Wan GX (2006). Regional features and variations of water vapor in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28, 15–21. (in Chinese with English abstract) [王宝鉴, 黄玉霞, 陶健红, 李栋梁, 王鹏祥 (2006). 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化. 冰川冻土, 28, 15–21.]
- Wang MB, Li HJ (1995). Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau Region in Northwestern Shanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 15, 178–184. (in Chinese with English abstract) [王孟本, 李洪建 (1995). 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究. 生态学报, 15, 178–184.]
- White JWC, Cook ER, Lawrence JR, Broecker WS (1985). The deuterium to hydrogen ratios of sap in trees: implications for water sources and tree ring deuterium to hydrogen ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 237–283.
- Williams DG, Ehleringer JR (2000). Intra- and interspecific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands. *Ecological Monographs*, 70, 517–537.
- Xu GQ, Li Y (2009). Root distribution of three co-occurring desert shrubs and their physiological response to precipitation. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 1, 120–127.
- Xu H, Li Y (2006). Water-use strategy of three central Asian



desert shrubs and their responses to rain pulse events. *Plant and Soil*, 285, 5–17.

- Yang ZH, Gao ZH (2000). Impact of precipitation and underground water level in the edge of oases on growth and decline of *Nitraria tangutorum* community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 927–930. (in Chinese with English abstract) [杨自辉, 高志海 (2000). 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响. *应用生态学报*, 11, 927–930.]
- Yi LP, Ma J, Li Y (2007). The comparisons of root system and root hair morphological characteristics among three desert halophytes. *Bulletin of Botanical Research*, 27, 204–211.

(in Chinese with English abstract) [弋良朋, 马健, 李彦 (2007). 3种荒漠盐生植物根系及根毛形态特征的比较研究. *植物研究*, 27, 204–211.]

- Zhang XP, Liu JM, Sun WZ, Huang YM, Zhang JM (2006). Study on relationship between stable oxygen isotope in precipitation and relative metrological parameters in Southwest China. *Science in China (Series D)*, 36, 850–859. (in Chinese) [章新平, 刘晶淼, 孙维贞, 黄一民, 张剑明 (2006). 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究. *中国科学(D辑)*, 36, 850–859.]

责任编辑: 林光辉 责任编辑: 李 敏