

DOI: 10.5846/stxb201508311804

马辉英, 杨晓东, 吕光辉, 何学敏, 张雪妮, 汪溪远, 李岩. 新疆艾比湖湿地自然保护区荒漠优势种体内的水分来源. 生态学报, 2017, 37(3): - .  
Ma H Y, Yang X D, Lü G H, He X M, Zhang X N, Wang X Y, Li Y. Water sources of dominant desert species in ebinur lake wetland nature reserve, Xinjiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

# 新疆艾比湖湿地自然保护区荒漠优势种体内的水分来源

马辉英<sup>1,2,3</sup>, 杨晓东<sup>1,2,3,\*</sup>, 吕光辉<sup>1,2</sup>, 何学敏<sup>1,2</sup>, 张雪妮<sup>1,2</sup>, 汪溪远<sup>1,2,3</sup>, 李岩<sup>1,2</sup>

1 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

3 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

**摘要:** 植物体内各水分来源的比例反映植物的适应特征, 在水分作为限制因子的荒漠区, 其更是物种间生态位分化、荒漠多样性维持的重要机理之一。通过检测艾比湖湿地自然保护区内 4 个生境(荒漠、河岸林、盐沼地和沙丘)的 8 科 14 种优势种的木质部, 以及当地河水、地下水、4 层不同深度(0—40, 40—70, 70—100 cm 和 100—150 cm)土壤水的稳定氧同位素值( $\delta^{18}\text{O}$ ), 估算各物种和各科植物体内各种水分来源的比例, 随后依据根系的空间位置再将 14 种植物分成 13 个中深根系和 1 个浅根系物种, 进一步利用  $\delta^{18}\text{O}$  值分析深浅根系植物间的水分差别, 以及各水源间的补给关系。结果表明: (1) 艾比湖湿地自然保护区内, 不同物种体内水分来源存在差别。将所有优势物种按科属归类后, 类似物种水平, 不同科属植物体内的水分来源也存在差别; (2) 地下水是大部分植物的主要补给水源, 多数植物很少利用 0—40 cm 表层土壤水; (3) 深浅根系植物的水分来源不同, 深根系植物主要利用地下水和河水, 而浅根系植物主要利用土壤水; (4) 艾比湖湿地自然保护区内, 地下水补给河水, 随后两者共同从土壤深层至浅层依次补给土壤水。综上所述: 干旱荒漠内, 水源可利用性的多样化, 导致不同区域植物体内各水分来源的比例存在差别。在离河岸距离、地下水位高低、土壤表层盐渍化程度等因素的综合影响下, 多年生和盐渍环境生长的植物, 趋向于吸收地下水、河水和深层土壤水, 相反, 一年生或短命植物趋向于利用其能触及到的各种水源。

**关键词:** 水分来源;  $\delta^{18}\text{O}$ ; 深根系植物; 浅根系植物; 荒漠; 大气凝结水

## Water sources of dominant desert species in ebinur lake wetland nature reserve, Xinjiang, China

MA Huiying<sup>1,2,3</sup>, YANG Xiaodong<sup>1,2,3</sup>, LV Guanghui<sup>1,2</sup>, HE Xueming<sup>1,2</sup>, ZHANG Xueni<sup>1,2</sup>, WANG Xiyuan<sup>1,2,3</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China

2 Institute of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang Education Ministry Key Lab of City Intelligenizing and Environment Modeling, Urumqi 830046, China

**Abstract:** The proportions of water sources in plants are related to plant adaptation, and reflect the mechanisms of niche differentiation and diversity in arid desert regions. At present, traditional physical methods is hard to determine the proportions of water sources in plants. But, due to the stable isotopes does not existed fractionation when it transported from the roots to the leaves, the stable hydrogen-oxygen isotope content ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ ) were essentially unchanged among roots, xylem, and the water sources. This resulted in the hydrogen-oxygen stable isotope analysis as a tool for accurately identifying

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500343, 31560131, 41571034)

收稿日期: 2015-08-31; 网络出版日期: 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjyangxd@sina.com

the proportions of water sources in plants. In the present study,  $\delta^{18}\text{O}$  of the xylem of 14 dominant desert species in 8 families (including *Apocynaceae*, *Chenopodiaceae*, *Tamaricaceae*, *Leguminosae*, *Salicaceae*, *Zygophyllaceae*, *Compositae* and *Polygonaceae*), river water, groundwater, and 4 layers soil water (including 0—40, 40—70, 70—100, and 100—150 cm) were measured respectively in desert, riparian forest, salt marsh, and sand dunes of Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang, China. Based on the roots distribution and  $\delta^{18}\text{O}$ , 14 dominant desert species were firstly classified into 13 deep-rooted species and 1 shallow-rooted species, and then the proportions of water sources in plants, the differences of water utilization strategies between the deep- and shallow-rooted plants, and the replenishment relationships among water sources were analyzed. The results showed that: (1) the proportions of water sources in plants were different among species and families in the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve; (2) groundwater occupied the largest proportion in water sources in plants, whereas the 0—40-cm layer soil water was rarely used; (3) the proportions of water sources in plants differed between deep- and shallow-rooted plants. Groundwater and river water were the main sources for deep-rooted plants, whereas the soil water was the primary source for shallow-rooted plants; (4) groundwater contributed to river supply, and subsequently, these two waters were discharged into the soil waters from deep to shallow soil layers; (5) atmospheric condensed waters as a special precipitation in arid desert, to some extent, it also discharged into the soil water, river water and groundwater. Overall, in the arid desert region, the diversity of availability in water sources showed a large variation in the proportions of water sources in plants among species and families. Additionally, under the comprehensive influences of the distance from habitat to riverbank, groundwater levels, and soil salinization levels, the perennials and halophytes mainly absorbed the groundwater, river water, and deep soil water. On the contrary, the annuals and ephemeral plants utilized all water sources that could be reached and absorbed by their roots.

**Key Words:** water sources;  $\delta^{18}\text{O}$ ; deep-rooted plants; shallow-rooted plants; desert; atmospheric condensed waters

目前,利用传统物理方法确定植物体内水分来源时存在较大困难<sup>[1]</sup>,而水中氢、氧稳定同位素分析正好可弥补该过程的不足<sup>[1-6]</sup>。自然条件下,植物可利用水源包括降水、土壤水、地表和地下径流(地表径流包括融雪、融冰等汇集而成的河水,地下径流为地下水)。其中,土壤水、河水和地下水最初也来源于降水,但由于降水中稳定同位素组成的季节性差异及水分输移或相态转化过程中的同位素分馏,使各种水源的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  存在差异<sup>[3-4,6-7]</sup>。在植物体内,根系吸收水分沿木质部向叶片蒸发部位输送时,水分过程以液流形式存在,因而和外界环境不发生水分的交换或蒸发,同位素不存在分馏现象<sup>[2-3]</sup>,造成植物根和茎内水的  $\delta^{18}\text{O}$  与可供植物吸收水源的  $\delta^{18}\text{O}$  相近<sup>[1-5,7-12]</sup>。因此,分析植物和植物可能利用水源的  $\delta^{18}\text{O}$ ,可判断植物短期和长期的水分利用方式<sup>[3-5,13-14]</sup>。另外,分析不同水源在植物体内所占比例,能够联系植物特殊的水分适应特征,反映出物种间的共存信息<sup>[12,15-18]</sup>。

我国的西北干旱区荒漠,约占国土面积的 11.4%。其内年降雨量稀少,水分是生态系统主要的限制性因子。在内含河流的干旱荒漠内,缘于离河岸的距离,以及地下水位的变化,不同局域植物对河水、地下水的可获得性存在差别。即:在离河岸较近区域,植物容易吸收河水,而在离河岸较远、地下水位较浅的区域,其主要利用地下水。另外,土壤表层盐渍化程度也能诱导植物的可利用水源发生变化,因为在高盐渍化区域,植物通常选择吸收含盐量较小的深层土壤水、地下水和河水,用以减小盐胁迫带来的伤害;相反,在低盐渍化区域,植物可吸收利用表层土壤水<sup>[8,19-20]</sup>。因此,可以推测出:生活在荒漠不同区域的植物,由于生境间水源可获得程度的多样性,其体内的水分来源存在差别。此外,植物进化过程中,同一局域中,环境筛选使亲缘较近物种容易产生相似的资源利用方式。干旱荒漠中,在背景值一致的局域环境中,若按科属将植物归类,随后类比不同科属植物体内的水分来源时可能发现:环境筛选可能造成不同科属植物体内的水分来源存在差别。然而,截止目前,虽然国内存在较多有关植物水分来源的论述性报道<sup>[5,11-12,16-17,21]</sup>,但系统地采集不同区域的植物,利用稳定同位素的判断干旱区荒漠植物体内的水分来源,并不多见<sup>[18,22-23]</sup>。

干旱荒漠内,在降水量极度微小可忽略不计情况下,河水、地下水和土壤水是植物的最主要水分来源<sup>[13,19,24]</sup>。对于河水,季节性消融补给的冰雪融水,以及农业和生态需水的季节性变化,都能使以冰雪融水作为补给源的河水具有明显的枯洪期,使其成为一种不稳定性水源。同样,土壤水在蒸发量差异、波动性降水、季节性河水补给等因素的影响下,也是一种不稳定的水源。相反,由于地下储水层的缓冲作用,地下水基本上不随季节发生变化,是一种稳定的水源。植物在长期进化过程中,为提高适合度,常常选择吸收稳定性水源<sup>[5,8]</sup>。因此,可以推测:干旱区荒漠内,当河水、地下水、土壤水同时可以利用时,植物通常选择地下水作为其主要的水分来源,即:相对于河水和土壤水,地下水在植物体内水分比例值最高。

地下水作为干旱区荒漠植物主要利用的稳定水源(上段推测),然而其埋藏较深,植物吸收利用时,需投资较多营养用于垂直根系生长。在此过程中,植物消耗了较多营养。相反,不稳定的土壤水,相对地下水,分布在离地表较近的位置,植物利用时无需消耗较多营养,但由于盐渍化影响受水分胁迫概率较大。艾比湖荒漠内,依据垂直根系分布位置,可将植物划分为中深根系和浅根系两种类型。中深根系植物的多数根系分布在土层 70 cm 以下,多为多年生的草本和木本植物,而浅根系植物的根系主要分布在 0—70 cm 土层内,多数为一年生的短命草本植物<sup>[25]</sup>。对于深根系植物,生活史较长,各生长季节都需供给水分,因而需增加较多的营养投资给垂直根生长,以长期稳定地吸收地下水。相反,对于浅根系植物,生活史较短,不可能投入更多营养用于垂直根生长。在这种情况下,浅根系植物通常广泛地吸收其根系能接触到的潜在各种水源,用以提高水分整体利用效率和其对荒漠环境的适合度。因此,可以推测:深浅根系植物的水分来源存在差别:深根系植物采取了单一的水源利用方式,主要利用稳定的地下水;相反,浅根系植物可利用地下水、河水、土壤水等多种水源,采取了多头下注的水源利用方式。但截至目前,对于深浅根系植物水分利用方式的差别,研究甚少。

干旱荒漠区的地表(河水)和地下径流(地下水)都由冰川消融后的水分渗透和汇集作用形成。一般情况下,发源于同一区域的地表和地下径流,地表水水位线高于地下水,河水补给地下水。随后,随流程距离增加,在人类利用、蒸发、覆盖面积、隔水层高程等不断变化的影响下,两者补给方向能够发生改变<sup>[4,26]</sup>。在艾比湖流域,由于河水的易利用性,当地的农业、工业和生态用水主要以河水为主。因此,随河水流程增加,河水消耗量逐渐增加,河水的水位线不断下降。当河流流至艾比湖湿地自然保护区内,河水量水位线可能下降至地下水水位线以下,地下水开始补给河水。此外,在年降雨量不足 150 mm 的艾比湖地区,降水对土壤水分的补给微弱不计<sup>[25,27]</sup>,土壤水分可能主要来源于地下水和河水的补给。因此,可以推测:在艾比湖湿地保护区内,地下水补给河水,随后地下水和河水共同补给土壤水。但是,在当前的所有研究中,并未有河水、地下水、土壤水间补给方向的相关报道。

基于以上,在西北干旱区荒漠内选择在艾比湖湿地自然保护区,通过分析其内不同生境主要荒漠优势植物的水分来源,旨在解决如下科学假设:(1)不同生境各水源可获得性的多样化,导致植物间、植物科属间的水源利用方式存在差别,但在所有的水源中,地下水稳定特性,使其成为荒漠优势种植物最为主要的利用水源;(2)深根系植物采取单一的水分利用方式,主要利用地下水,相反,浅根系植物采取多头下注的水分利用方式,可利用土壤水、地下水和河水等多种水源;(3)在降水量可忽略不计的条件下,艾比湖湿地自然保护区内,地下水补给河水,随后两者共同从土壤深层至浅层依次补给土壤水。解决上述科学问题,对于揭示荒漠植物对于干旱环境特殊的适应机制和物种间的共存机理,为生态建设中的物种选择和搭配等提供科学依据和理论支持。

## 1 研究区概况

艾比湖地区(44°30—45°09'N 和 82°36'—83°50'E)位于新疆维吾尔自治区境内,是准噶尔盆地西部最低洼地和水盐汇集中心。总面积 2670.85 km<sup>2</sup>,年降水量约 100 mm,蒸发量 1600 mm 以上,日照时数约 2800 h,年平均温度为 6—8℃,属典型温带大陆性干旱气候。该地区地貌景观多样,集湿地和荒漠化过程为一体。植物区系受中亚和蒙古植物区系的影响,植被过渡性明显,典型群落主要有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、胡杨

(*Populus euphratica*)、芦苇(*Phragmites australis*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、小獐茅(*Aeluropus pungens*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、碱蓬(*Suaeda pterantha*)、琵琶柴(*Reaumuria soogarica*)和盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等<sup>[28]</sup>。

## 2 研究方法及野外采样

### 2.1 模型选择

水分在植物木质部输送,水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值不发生改变,可将植物体内水的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值视为各水源的 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值按吸收比例混合的结果。因此,只要各可能水源的稳定同位素组成具有足够的差异(大于实验误差),对比分析植物体内和各水源的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值,就可以确定植物对这些水源的吸收比例<sup>[9]</sup>。

确定植物对各水源吸收比例的基本原理是:如果存在几个可能的水源,则植物体内水的同位素值应该是各水源同位素值的线性混合值,据此,可建立各潜在水源同位素值线性混合模型:

$$\sigma(^2D_p) = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \sigma(^2D_i) \quad (1)$$

$$\sigma(^{18}O_p) = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \sigma(^{18}O_i) \quad (2)$$

$$1 = \sum_{i=1}^n f_i \quad (3)$$

式中, $\delta(D_p)$ 、 $\delta(^{18}O_p)$ 分别是植物体内水的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值;而 $\delta(D_i)$ 、 $\delta(^{18}O_i)$ 分别是水源 $i$ 的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值; $f_i$ 是植物对水源 $i$ 的吸收比例。可以看出,同时利用 $D$ 、 $^{18}O$ 同位素,最多可建立3个方程。当植物的潜在水源少于3个时,可求出 $f_i$ 的唯一解;当水源超过3个时,Phillips等提出了确定各潜在水源贡献比例上、下限的IsoSource方法<sup>[29-30]</sup>。

### 2.2 野外采样

为去除荒漠的强蒸发过程对植物体内水分、土壤水分造成可能的分馏影响,于2011年8月中旬,在艾比湖当地5:30—6:30a.m.间(强蒸发过程未开始),在东大桥管护站附近选择背景较一致的一个5 km×5 km区域,在其内采集了当地4个生境(盐沼地、河岸、荒漠、沙丘)常见9群落的8科14种优势植物(表1和表2)。木本植物均采集超过两年的根和茎,而草本则采集茎与根相连部分。取样过程中,样品均去掉根和茎的外皮和韧皮部,只保留含有运输水分导管的木质部。每个植物随机采3株,后将每种植物采集样本混合,简易处理后迅速装入25 ml玻璃瓶,盖好瓶塞,用parafilm封口膜封口,放置于液氮罐中冷藏。地下水用研究点附近深度在地下水位的井水代替,共选择了3口井,河水为确保样品的代表性,分3段采集了阿奇科苏河深层水,3段间距离为1 km,采集时间与植物样一致。分3个采样点采集的地下水和河水,分别混合后也迅速装入玻璃瓶,盖好瓶塞,用parafilm封口膜封口,放入小冰箱(-5℃)后带回实验室置于4℃的冰箱中保存,直至测定。

对于土壤样品,在采样范围5 km×5 km面积内,随机在当地几种典型生境内,选择其内主要的分布群落类型梭梭群落(荒漠和沙丘生境)、杜加依林/胡杨群落(河岸生境)、盐穗木和盐节木群落(盐沼地生境),共3种类型。每种群落类型内各随机选择3个20 m×20 m样地。在每个样地内,随机在每个群落内选择3个点。每个点上,用铁锹挖一个深1.5—1.8 m的土壤剖面,根据植物细根分布、深浅根植物根系分布、地下水水位的位置<sup>[25]</sup>,将土壤剖面分为0—40 cm(植物毛细根主要分布区),40—70 cm(浅根系和中深根系植物主根系的分离区),70—100 cm(为土壤方便采集,取了70—150 cm间的中间部分),100—150 cm(地下水和土壤水的交汇区,当地地下水位约1.8—2 m)共4个土壤层。各层用土壤环刀采集1个土壤样品。随后,将每个样地内3个点上采集的3个土壤样品按土壤采集层分别混合,类同水样的处理过程,用parafilm封口膜密封于50 ml玻璃瓶中,带回实验室于4℃保存,直至测定。

另外,在土壤同位素样品采集结束后,在3个群落内,分别随机选择每个样地内3个采样点的一个(仪器数量所限,未能在每个群落的3采样点上都放置仪器),分0—40、40—70、70—100 cm和100—150 cm共4

层,依次由下至上放置土壤水分仪探头(Delta-T Devices, Cambridge, UK),放置时每层均用原土填充。仪器放置结束后,为消除干扰影响,缓冲 3 d,自第 4 天零时每隔 1 h 记录土壤容积含水量值,后连续观测 2 d。3 个群落内各测定 1 组数值,共测定了 3 组土壤容积含水量值。

### 2.3 同位素测定

同位素的测定在中国林业科学院稳定性同位素实验室内完成。样品从新疆乌鲁木齐运输至北京林业科学院过程中,样本全部置于放置冰袋的保温箱内,历时 6 h。同位素测定仪器为质谱仪(DELTA V Advantage Isotope Ratio Mass Spectrometer, Thermo, Waltham, MA, USA)。测定过程中,每个样品取 3 次样,每次样测定 1 次,每个样品共检测三次,最后取三次检测结果中的中间值作为实验测定结果。对于水样和植物样品,测定记录值只有 1 个,而对土壤,由于采集了 3 个群落,每个群落有 3 个样地,共记录有 3 组数值。测定中土壤和植物的水分通过“土壤液态水真空冷凝抽提系统”抽取,当土壤含水量较低,延长抽取水分时间,直至获得足够量质谱仪分析所需水分。标准样品连续测定精度为  $\delta D: <3\text{‰}$ ;  $\delta^{18}O: <0.5\text{‰}$ 。

### 2.4 数据处理

本文依据植物根系分布和地下水水位的位置,将土壤分成地面下 0—40、40—70、70—100 cm 和 100—150 cm 共 4 层。每层土壤的水分作为一个潜在水源,加上河水和地下水,水源数共计 6,其总数大于 3,故采用 IsoSource 上下限方法计算植物体内各潜在水源的比例。数据计算过程在 IsoSource 1.3.1 软件中完成,计算时增幅设为 1%,不确定水平设为 0.2%,具体计算过程可见 Phillips and Gregg<sup>[29]</sup>。IsoSource 1.3.1 软件来源于 <http://www.epa.gov/wed/pages/models.htm>。另外,为证明利用 IsoSource 上下限方法的有效性、以及土壤容积含水量在土层间的差别,本文利用单因素方差(One-way ANOVA)分析比较了土壤各层间氧同位素值、土壤容积含水量的差别。单因素方差分析中,方差齐性时采用 LSD 两两比较,不齐性时采用 Tamhane's T2 两两比较。单因素方差分析在 SPSS 17.0 中实现,相应图在 Origin 8.0 中制作。

## 3 结果分析

### 3.1 艾比湖常见优势植物利用各水源的比例

艾比湖 4 个区域采集 14 种优势植物的  $\delta^{18}O$  在  $-2.96$ — $-11.44\text{‰}$  间,平均值和方差为  $(-9.51 \pm 2.33)\text{‰}$ 。 $\delta^{18}O$  在不同区域优势种间的差异较大,苏打猪毛菜的  $\delta^{18}O$  最小( $-2.96\text{‰}$ ),梭梭的值最大( $-11.44\text{‰}$ ) (表 1)。所有调查植物中,荒漠和河岸生长的梭梭、泡泡刺(*Nitraria sibirica*)、白刺(*Nitraria schoberi*)、怪柳、琵琶柴、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴(*Karelinia caspia*)、白麻(*Poa cynosuroides*)和胡杨体内,地下水利用比值高达 50% 以上,其余 4 种水源利用总和不足 50% (表 1)。对于盐沼地生长的盐爪爪、盐穗木、盐节木和沙拐枣(*Calligonum ebinuricum*),地下水、河水、100—150 cm 深层土层土壤水的利用比例相当,均在 21.4%—27.5% 间(表 1)。沙丘上的苏打猪毛菜(*Salsola soda*)和上述 14 种植物水分来源的差异较大,呈相反趋势:0—40、40—70、70—100 cm 土层土壤水在苏打猪毛菜体内的利用比例分别为 33.1%、28.4% 和 14.5%,3 种水源占总比例的 76%,而河水、地下水和深层土壤,苏打猪毛菜利用较少,仅占总比例的 24% (表 1)。这些都说明,不同区域优势种植物体内水分来源存在差别。

另外,依据根系分布类型,浅根系草本苏打猪毛菜的  $\delta^{18}O$  为  $-2.96\text{‰}$ ,明显低于其它中深根系灌木或乔木的平均值( $Mean \pm SD$  为  $(-10.07 \pm 1.49)\text{‰}$ ) (表 1)。各水源在植物体内所占比例上,0—40 cm 和 40—70 cm 层的土壤水占浅根系植物苏打猪毛菜体内水分来源的 60% 以上。相反,对于中深根系植物,其体内的水源主要为地下水、深层土壤水和河水(表 1),即说明:中深根系和浅根系植物的水分来源存在差别。

### 3.2 艾比湖常见科属植物利用各水源的比例

艾比湖采集的 14 个常见荒漠优势物种,可归类成 8 个科。其中,夹竹桃科、豆科、杨柳科、菊科和蓼科各自仅有白麻、骆驼刺、胡杨、花花柴和沙拐枣 1 个物种,怪柳科和藜科分别有怪柳和琵琶柴、泡泡刺和白刺共 2 个物种,而藜科为艾比湖地区的主要分布科,分布有梭梭、盐爪爪、盐穗木、苏打猪毛菜和盐节木共 5 个种(表 2)。

表 1 14 种艾比湖湿地自然保护区荒漠优势种的氧同位素值及各水源在其体内的比例

物种 Species	生境 Habitats	群落类型 Community types	根分布类型 Roots distribution types	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	水分来源 Difference water sources proportion/%					
					4 土层的土壤水 Water of 4 soil layers					
					地下水 Ground water	河水 River water	0—40 cm	40—70 cm	70—100 cm	100—150 cm
盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	盐沼地	盐爪爪群落	中深根系	-8.37	0.275(0—0.75)	0.263(0—0.81)	0.061(0—0.25)	0.072(0—0.29)	0.116(0—0.18)	0.214(0—0.97)
梭梭 <i>Haloxyton ammodendron</i>	荒漠	梭梭群落	中深根系	-11.44	0.902(0.59—0.97)	0.088(0—0.41)	0.001(0—0.03)	0.001(0—0.03)	0.003(0—0.06)	0.005(0—0.13)
盐穗木 <i>Halostachys caspica</i>	盐沼地	盐穗木群落	中深根系	-7.42	0.215(0—0.67)	0.219(0—0.73)	0.089(0—0.32)	0.105(0—0.38)	0.156(0—0.63)	0.216(0—0.87)
苏打猪毛菜 <i>Salsola soda</i>	荒漠沙丘	苏打猪毛菜群落	浅根系	-2.96	0.071(0—0.33)	0.077(0—0.35)	0.331(0—0.67)	0.284(0—0.79)	0.145(0—0.67)	0.092(0—0.42)
盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	盐沼地	盐节木群落	中深根系	-7.89	0.242(0—0.71)	0.240(0—0.77)	0.074(0—0.28)	0.088(0—0.34)	0.137(0—0.56)	0.219(0—0.92)
泡泡刺 <i>Nitraria sibirica</i>	河岸	胡杨群落	中深根系	-10.73	0.689(0.13—0.93)	0.199(0—0.87)	0.011(0—0.06)	0.014(0—0.07)	0.025(0—0.12)	0.063(0—0.29)
白刺 <i>Nitraria schoberi</i>	河岸	胡杨群落	中深根系	-11.17	0.843(0.59—0.97)	0.104(0—0.41)	0.004(0—0.03)	0.005(0—0.03)	0.012(0—0.06)	0.032(0—0.13)
怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	河岸	怪柳群落	中深根系	-10.86	0.733(0—0.94)	0.170(0—0.73)	0.009(0—0.05)	0.011(0—0.06)	0.021(0—0.10)	0.054(0—0.24)
琵琶柴 <i>Reaumuria soongarica</i>	荒漠	梭梭群落	中深根系	-11.14	0.832(0.56—0.96)	0.111(0—0.44)	0.005(0—0.03)	0.060(0—0.03)	0.013(0—0.06)	0.034(0—0.14)
骆驼刺 <i>Alhagi sparsifolia</i>	荒漠	梭梭群落	中深根系	-10.51	0.614(0—0.92)	0.244(0—0.99)	0.014(0—0.08)	0.018(0—0.09)	0.032(0—0.16)	0.079(0—0.36)
花花柴 <i>Karelinia caspica</i>	荒漠	胡杨群落	中深根系	-10.75	0.696(0.15—0.93)	0.195(0—0.85)	0.010(0—0.06)	0.013(0—0.07)	0.024(0—0.12)	0.062(0—0.28)
沙拐枣 <i>Calligonum ebinuricum</i>	盐沼地	盐爪爪+ 盐穗木群落	中深根系	-8.48	0.284(0—0.76)	0.268(0—0.82)	0.058(0—0.24)	0.069(0—0.28)	0.111(0—0.47)	0.211(0—0.98)
白麻 <i>Poa cynosuroides</i>	荒漠	白麻群落	中深根系	-11.13	0.827(0.55—0.96)	0.114(0—0.45)	0.005(0—0.03)	0.006(0—0.04)	0.013(0—0.06)	0.035(0—0.15)
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	河岸	胡杨群落	中深根系	-10.33	0.559(0—0.90)	0.273(0—0.97)	0.017(0—0.09)	0.021(0—0.11)	0.038(0—0.18)	0.092(0—0.43)

注:括号外数值为来源水在植物体内总水分 1 按各水源进行划分,占据率越接近于 1,表示该来源水在植物体内占据比例越大。括号内数值表示来源水对植物的某一确定占据率所出现的频率,频率值越高,表示植物最可能吸收该来源水

从  $\delta^{18}\text{O}$  在不同科植物间的分布看,蓼科的  $\delta^{18}\text{O}$  最低 ( $-8.48\text{‰}$ ),夹竹桃科 ( $-11.13\text{‰}$ ) 和柽柳科 ( $Mean \pm SD$  为  $(-11.00 \pm 0.20)\text{‰}$ ) 的值最高(表 2)。所有调查科中,夹竹桃科、柽柳科、豆科、杨柳科、蒺藜科和菊科主要利用河水和地下水,两者所占水分利用比例在 60% 以上(表 2)。而对于藜科和蓼科,地下水、河水、100—150 cm 在其体内的分布值均在 21.1%—28.4% 之间,说明藜科和蓼科主要利用地下水、河水和 100—150 cm 深层土壤水(表 2)。

表 2 艾比湖湿地自然保护区 8 种常见科属植物的氧同位素值及各水源在其体内的比例

Table 2 The proportion of water sources and  $\delta^{18}\text{O}$  in 8 dominant families in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve

科属 Family	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	水分来源 Difference water sources proportion/%					
		地下水 Ground water	河水 River water	4 土层的土壤水 Water of 4 soil layers			
				0—40 cm	40—70 cm	70—100 cm	100—150 cm
夹竹桃科 Apocynaceae	-11.13	0.827(0.55—0.96)	0.114(0—0.45)	0.005(0—0.03)	0.006(0—0.04)	0.013(0—0.06)	0.035(0—0.15)
藜科 Chenopodiaceae	-7.62 $\pm$ 3.04	0.234(0—0.70)	0.233(0—0.76)	0.079(0—0.29)	0.093(0—0.35)	0.143(0—0.58)	0.219(0—0.90)
柽柳科 Tamaricaceae	-11.00 $\pm$ 0.20	0.782(0.41—0.95)	0.142(0—0.59)	0.007(0—0.04)	0.009(0—0.04)	0.017(0—0.08)	0.044(0—0.19)
豆科 Leguminosae	-10.51	0.614(0—0.92)	0.244(0—0.99)	0.014(0—0.08)	0.018(0—0.09)	0.032(0—0.16)	0.079(0—0.36)
杨柳科 Salicaceae	-10.33	0.559(0—0.90)	0.273(0—0.97)	0.017(0—0.10)	0.021(0—0.11)	0.038(0—0.18)	0.092(0—0.43)
蒺藜科 Zygophyllaceae	-10.95 $\pm$ 0.31	0.765(0.36—0.95)	0.152(0—0.64)	0.007(0—0.04)	0.010(0—0.05)	0.018(0—0.09)	0.048(0—0.21)
菊科 Compositae	-10.75	0.696(0.15—0.93)	0.195(0—0.85)	0.010(0—0.06)	0.013(0—0.07)	0.024(0—0.12)	0.062(0—0.28)
蓼科 Polygonaceae	-8.48	0.284(0—0.76)	0.268(0—0.82)	0.058(0—0.24)	0.069(0—0.28)	0.111(0—0.47)	0.211(0—0.98)

注:括号外数值为来源水在植物体内占据率,原理为将植物体内总水分 1 按各水源进行划分,占据率越接近于 1,表示该来源水在植物体内占据比例越大;括号内数值表示来源水对植物的某一确定占据率所出现的频率,频率值越高,表示植物最可能吸收该来源水

### 3.3 $\delta^{18}\text{O}$ 在土壤、河水、地下水、植物间的变化

随土壤深度增加, $\delta^{18}\text{O}$  逐渐显著偏负,4 个土壤水源间存在显著性差别 ( $F = 13.69, P < 0.001$ ),表明利用 IsoSource 上下限方法计算植物体内各潜在水源的比例是合理的(图 1)。在 4 个采样土层间,从上至下,0—40cm 土层和其余 3 层间差别最大,其值为  $(2.02 \pm 3.36)\text{‰}$ ,明显偏正。其余 40—70、70—100 cm 和 100—150 cm 土层的  $\delta^{18}\text{O}$  分别为  $(-3.53 \pm 2.41)\text{‰}$ 、 $(-5.45 \pm 0.46)\text{‰}$  和  $(-8.35 \pm 1.05)\text{‰}$ ,同位素值均偏负(图 1)。

综合分析所有土层  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围和平均值后,发现土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  的变化范围 ( $Mean \pm SD$ ) 为  $(-1.86 \pm 4.92)\text{‰}$ ,其值相对河水值偏负 ( $-10.59\text{‰}$ ),而地下水值 ( $-11.55\text{‰}$ ) 相对河水更为偏负。即说明  $\delta^{18}\text{O}$  在各水源间:地下水 < 河水 < 土壤水(图 1)。这说明,在艾比湖湿地自然保护区内,地下水补给河水,随后河水和地下水共同补给土壤水。另外,将 14 种植物的  $\delta^{18}\text{O}$  平均后发现,艾比湖地区常见植物的  $\delta^{18}\text{O}$  变化范围 ( $Mean \pm SD$ ) 为  $(-9.51 \pm 2.33)\text{‰}$ ,其值高于河水和地下水,低于各土层土壤水(图 1)。

### 3.4 土壤容积含水量在土层间的变化

艾比湖湿地自然保护区内,随土层深度增加,土壤容积含水量显著增加。另外,表层土层(0—40 cm)容积含水量的变化幅度最大,观测期间误差值 ( $SD$ ) 为 5.88,其余土层随深度增加,容积含水量的变化幅度/ $SD$  逐渐减小,至 100—150 cm 成最小值, $SD$  值仅为 0.22(图 1)。

## 4 讨论

### 4.1 艾比湖不同生境优势种植物体内的水分来源

本次实验中,在 4 个生境共调查到 8 科 14 种植物。其  $\delta^{18}\text{O}$  在  $(-2.96—-11.44)\text{‰}$  间,平均值和方差为

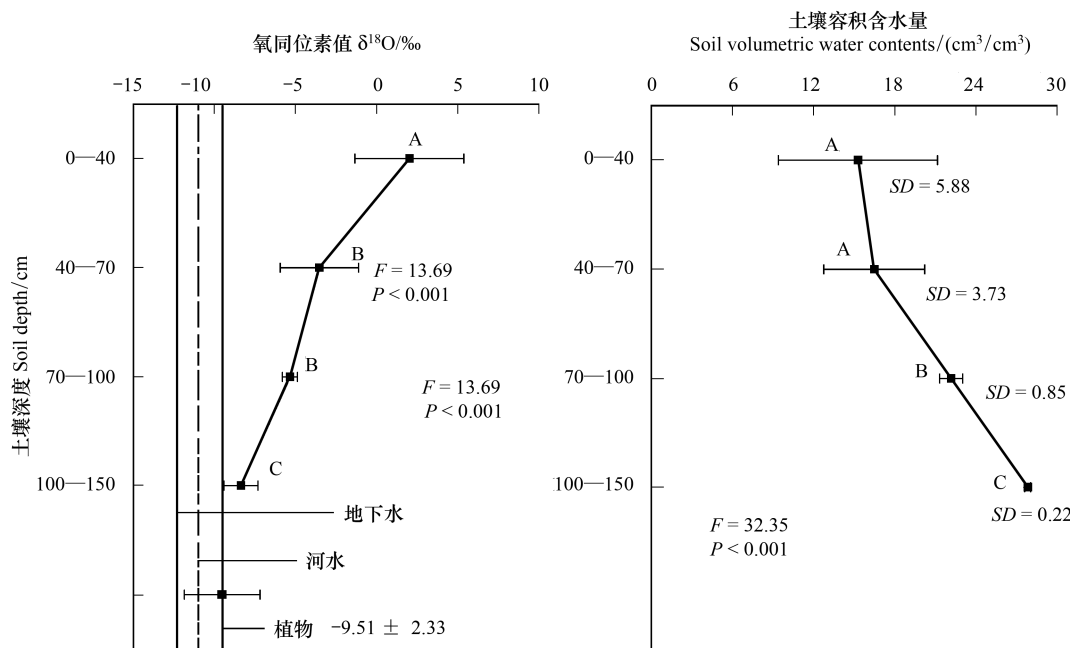


图1 各水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值以及4土层的容积含水量

Fig.1  $\delta^{18}\text{O}$  of water sources and the soil volumetric water contents of 4 soil layers

图内大写字母和数字为各水源间 $\delta^{18}\text{O}$ (图1-a)、各土层间容积含水量(图1-b)单因素方差分析的结果。不同字母表示水源间的 $\delta^{18}\text{O}$ 、容积含水量存在显著性差别,相同字母为水源间未有显著性差别。 $P < 0.001$

( $-9.51 \pm 2.33$ )‰。这和处于周边的准噶尔盆地东南缘植物体内的 $\delta^{18}\text{O}$ ( $-11.93$ — $-3.98$ )‰相近<sup>[11,16,18]</sup>,表明本次同位素的实验分析结果较为可信。但本次结果的最小值偏负于干旱区纬度较低的黑河流域( $-6.90$ — $-4.80$ )‰,而最高值又较高<sup>[31]</sup>。这表明艾比湖地区的蒸发量相对黑河流域较大,而地下水水位又较之黑河流域较浅。因为在这种情况下,地表较高的蒸发过程使氧同位素分馏速率加剧,偏向于正数,而较浅的地下水,更易于植物吸收利用,使植物体内的氧同位素负数化,最终造成艾比湖流域 $\delta^{18}\text{O}$ 分布区间宽于黑河流域。

艾比湖地区,地下水是大部分植物的主要补给水源。本次调查中,生长在荒漠和河岸的9个物种(梭梭、泡泡刺、白刺、怪柳、琵琶柴、骆驼刺、花花柴、白麻和胡杨),其体内地下水约占总水比例的60%以上,这说明这些植物主要利用地下水。在主要利用地下水的植物中,梭梭体内地下水含量达到90.2%,分布频率在59%—97%之间,是利用地下水比例最高的物种,而其余8个物种体内地下水含量大致在55.9%—84.3%间,分布频率在0%—97%间,他们的上述两值均低于梭梭。这从一方面说明,梭梭较其它物种,利用水源量较少,这使在较易获取地下水的区域,梭梭由于能集中吸收利用地下水,同时减少对其余水源吸收的营养投入,利于梭梭获得水分利用的资源生态位优势,成为艾比湖地区荒漠群落的建群种。相反,在地下水不易获得区域,由于梭梭主要利用地下水,较少吸收其它水源的水分利用策略,这使得相对其余物种,会限制并缩小梭梭的水资源生态位优势,减小梭梭在荒漠群落中的重要值,继而成为非建群种。这一现象,通常在荒漠区表现为:在地下水位较浅,地下水对土壤水进行大量补给,土壤含水量较高的区域,梭梭长势良好,其在群落中的重要值高,是荒漠群落的建群种;相反,在地下水位较深,地下水对土壤补给量较少,土壤含水量较低的区域,梭梭长势较差,其在群落中的重要值低,并非荒漠群落的建群种。

本研究中,胡杨也作为主要利用地下水的植物,其体内地下水约占总水比例的55.9%,分布频率在0%—90%间。以上这两数值和其余主要利用地下水的8个植物(梭梭、泡泡刺、白刺、怪柳、琵琶柴、骆驼刺、花花柴、白麻)相比,数值最小。这表明胡杨对于地下水的依赖性较之其它8个物种较小。另外,胡杨作为干旱区荒漠河岸林(杜加依林)的建群种,它易于直接吸收利用河水,如在本研究中,河水在胡杨体内的比例为27.3%,是地下水以外的第二大水源。这使得胡杨在利用河水策略的要求下,只能生长在河流附近,成为杜加



依林的优势种。与人们通常的理解相悖,胡杨生长在河边,河水为其更易于获得的水源,河水应在胡杨体内的比例高于地下水。但在本研究中,胡杨利用地下水(55.9%)的比例高于河水(27.3%),这是因为,干旱区河水由于补给水源的不规则性,譬如季节性融雪补给、季节性降水补给等,容易使河水形成枯水和洪水期,河水为不稳定水源。而对于地下水,由于储存的缓冲作用以及迁移的缓慢性等,使地下水位稳定水源。因此,在进化过程中,植物优先选择了稳定水源。即:胡杨优先利用地下水。这和 Dawson 等的研究较为一致<sup>[8-9]</sup>,即河岸树木并不像人们所想象的那样依赖于地表河水,而是利用更为稳定的地下水。

除过上述 9 种主要利用地下水的物种,在本研究中,还发现对于盐爪爪、盐穗木、盐节木和沙拐枣 4 种盐沼地生长的植物,地下水、河水、100—150 cm 深层土层土壤水的利用比例相当,均在 21.4%—27.5% 间。说明这 4 种植物主要利用地下水、河水、100—150 cm 深层土层土壤水。艾比湖湿地自然保护区中,由于湖水(艾比湖为咸水湖)的渗透和补给作用,使距离艾比湖湖区较近的区域,地下水位浅、土壤水分和盐分含量较高,是盐渍化程度较高的区域。这种区域中,土壤盐分含量随土壤深度增加而减小。因此,植物为减小盐分胁迫,通常较少在含盐量较高区域(表层土壤)吸收水分,而是将根生长至盐分含量相对较少的土壤深层,以减少盐分浓度引起的渗透胁迫作用。在艾比湖湿地自然保护区中,盐爪爪、盐穗木、盐节木和沙拐枣均为耐盐碱植物,是调查物种中耐盐碱最好的物种,其主要分布在离湖区较近的土壤盐渍化程度较高盐沼地区,少吸收利用含盐量较高土壤表层水,主要吸收含盐量较低地下水、河水和 100—150 cm 深层土层土壤水,有利于这些植物提高抗盐碱的能力,保证这些物种的存活率。

另外,本次研究中,生长在沙丘的苏打猪毛菜和其余 14 个物种水分来源的结果完全相反:浅层土壤(0—100 cm 土层)水分占其体内总水分比例的 76%,而河水、地下水和深层土壤,苏打猪毛菜利用较少,仅占总比例的 24%。这表明苏打猪毛菜主要利用土壤水。苏打猪毛菜是 1 年生的短命草本植物,水分对其生活史过程的限制性较强。通常,其在水分有利的季节需要迅速完成其生活史周期,这使得苏打猪毛菜在短期内不可能投入更多营养用于垂直根生长,因而其在土壤表层分布的根系较多,体内水分来源主要为表层土壤水。综合上述段落可知:艾比湖湿地自然保护区内,不同区域的优势种,其体内水分来源存在差别。

荒漠内植物根系的构型方式和生长状况,基本由两个方面决定。一个来源于植物本身的遗传,另外一个则是植物易获得水分的空间分布位置<sup>[32-33]</sup>。在艾比湖植物采样的 5 km×5 km 区域内,土壤和地下水含量空间差异不大。因而在各科间水分利用方式的差异主要由遗传决定。将所采集到 14 种植物,按科属归类后发现,不同科间植物体内的水分来源存在差别:蓼科和藜科的  $\delta^{18}\text{O}$  较高,植物趋向于利用土壤水,而夹竹桃科、柽柳科、豆科、杨柳科、蒺藜科和菊科的值较低,主要趋向于利用河水和地下水(表 2)。另外,统计植物的根系分布类型后发现,利用土壤水的蓼科和藜科多数为浅根系植物,相反,利用河水和地下水的夹竹桃科、柽柳科、豆科、杨柳科、蒺藜科和菊科均为深根系植物。依据 Ehleringer 等研究成果,多年生植物通常吸收土壤深层水分或地下水维持其生存,而其他物种则发育浅根系以利用短暂的降水事件<sup>[34]</sup>。在表 1 和表 2 中,夹竹桃科、柽柳科、蒺藜科、菊科和豆科等多年生且具有较深根系的植物,体内有 50% 以上水分都来源于地下水,其主要利用地下水,而 1 年生浅根系的藜科和蓼科虽然地下水占体内含量的比值最大(28.4% 和 23.4%),但和其他水分源相比,如河水(23.3% 和 26.8%),100—150 cm 土壤水(21.9% 和 21.1%),总体上差距不大。说明:浅根系的藜科和蓼科植物采取了多头下注的策略,而深根系植物主要利用地下水,采取了单一的水分利用策略。浅根系植物和深根系相比,他们具有均衡化的水分利用方式,他们的水分利用能力更强,水分生态幅更宽,更能适应当地的水分限制环境。这一结论与干旱荒漠区植物科属的分布类型大体一致:干旱荒漠中,藜科和蓼科是最为常见的荒漠植物分布类型。但在本文中,由于:(1)荒漠中浅根系植物多为短命植物,其通常在 7 月之前已完成生活史,本文采样时间在 8 月中旬,采集时获得的浅根植物较少;(2)荒漠常见浅根系植物(草本)数量也不像亚热带森林、温带草原等生态系统丰富,能供选择作为研究对象的植物较少。以上这两点都使本文采集 14 个植物中只有 1 个浅根系植物,造成文章对深浅根系植物间水分来源的论述,代表性略显不足。

#### 4.2 艾比湖湿地自然保护区内各水源间的补给方向

植物体内的水分主要来自降水、土壤水、径流和地下水。艾比湖湿地自然保护区隶属典型的干旱区荒漠,

其内年降水量极端稀少,因而降水对植物的贡献基本可忽略不计,植物体内的水分主要来源于冰川融雪水补给的地表和地下径流。在冰川融雪水融水形成地表和地下径流的过程中,蒸发、地下蓄水深度、地质特征、水分溶解特征和水分运动速度等能引起同位素分馏。一般认为,初始水源的  $\delta^{18}\text{O}$  偏负,后此值会逐渐增大。在我们的结果中,艾比湖地下水和河水的  $\delta^{18}\text{O}$  分别为  $-11.55\text{‰}$  和  $-10.59\text{‰}$ ,地下水相对于河水明显偏负。这说明艾比湖地区地下水可能是河水的补给水源。在国内外的大多数研究中,河水相对地下水  $\delta^{18}\text{O}$  偏负,河水是地下水的补给水源<sup>[31]</sup>。这与本文的研究结果不同,原因可能为:在干旱区最主要的补给源头——冰川融水,初始补给地下水和河水这两个水源时,由于艾比湖流域的背景土壤为荒漠沙质土,冰川融水在汇集成地表径流的同时,水分也渗透至地下形成地下径流。因此,在地表水和地下水形成的初始阶段,两个水源间水位线基本相同,相互很少进行补给。随后,在地表和地下径流的流动过程中,在水分作为限制因子的干旱区,由于地表径流(河水)更易于被人类所利用,河水又很少有降水补给等原因,使河水随流程增加水量迅速减小,水位线降低,而地下径流(地下水)开采较地表水复杂,随流程增加,其水量变化较小,减少幅度相对河水较小。这使地下水的水位线也随流程逐渐高于河水,出现了地下水补给河水的现象。

本研究中,地下水、河水的  $\delta^{18}\text{O}$  偏负于土壤( $-1.86 \pm 4.92\text{‰}$ ),另外,随土壤深度减小,土层的  $\delta^{18}\text{O}$  逐渐偏正。这说明,在艾比湖湿地自然保护区中,地下水和河水首先补给深层土壤水,随后在蒸发作用下,水分由土壤深层向浅层传输,深层土壤水再补给浅层土壤水。对这一过程,也可以通过各土壤的容积含水量进行验证:本文中,随土层深度增加,容积含水量显著增加( $F = 32.35, P < 0.001$ ) (图 1)。一般地,水分含量较多区域的水势较高,而含量较低区域的水势较低,在土壤水势作用下,水分从含水量较高区域传输至较低区域。图 1 中,从土壤深层至浅层,土壤容积含水量显著减小,表明深层土壤水补给了浅层土壤水。

另外,本研究中,0—40 cm 土层和其余 3 层间差别最大, $\delta^{18}\text{O}$  明显偏正(图 1-a),况且 0—40 cm 土层的  $\delta^{18}\text{O}$  相对黑河流域等其他地区<sup>[21-22,24,31]</sup>,氧同位素也偏正。说明艾比湖湿地自然保护区内的土壤蒸发强度较黑河流域等更高,水分从深土层传输至浅土层的速率较快,该过程使水分在土壤传输过程中分馏速率加剧,将小分子的  $^{16}\text{O}$  蒸发至大气中,而  $^{18}\text{O}$  富集在土壤表层,使  $\delta^{18}\text{O}$  明显偏正。

## 5 结论与展望

艾比湖湿地自然保护区内,生长在不同区域植物体内的水分来源存在差别。依据各水分来源在植物体内占据的比例,大致可将本文采集到 14 个荒漠优势种归属如下:(1)荒漠和河岸的优势植物(梭梭、泡泡刺、白刺、怪柳、琵琶柴、骆驼刺、花柴、白麻和胡杨),主要利用地下水。在其体内,地下水利用比例高达 50% 以上,其余水源利用总和不足 50%;(2)盐沼地的优势植物(盐爪爪、盐穗木、盐节木和沙拐枣),主要利用地下水、河水和深层土层水,其体内地下水、河水、100—150 cm 深层土层土壤水的利用比例相当,均在 21.4%—27.5% 间;(3)生长在沙丘的植物(苏打猪毛菜),主要利用浅层土壤水,0—40、40—70 cm 和 70—100 cm 土层土壤水的总和其体内水分的 76%。

将 14 个物种按根系在土壤空间的分布位置划分成浅根系和中深根系植物后,发现在艾比湖湿地自然保护区内,荒漠深浅根系植物的水分来源和水分利用策略均存在差别。即:中深根系的夹竹桃科、怪柳科、蒺藜科、菊科和豆科等多年生植物,采取较单一的水源利用策略,主要利用稳定的地下水;相反,藜科和蓼科等一年生浅根系的植物,为提高生存能力,保证水分持续供应,采取了多头下注的策略,利用较多水源,使地下水、河水、土壤水在体内占水分含量的比例相当。另外,较于降水持续补给河水和地下水的地区,艾比湖湿地自然保护区内地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  偏负于河水,而河水又偏负于土壤水,加之,随土层深度增加,土层的  $\delta^{18}\text{O}$  逐渐偏负。表明在艾比湖湿地自然保护区内,地下水的水位线较河水偏高,地下水补给河水,随后两者又补给土壤水,使水分在土壤中从深层向浅层传输。

大气凝结水是指当物体表面温度低于周围大气露点温度时,大气中汽态水在物体表面凝结形成的水源。已有研究证明,内含湖泊、水库和河流等水体的荒漠,其大气凝结水水量较其他荒漠较大,凝结水对植物的影

响也较为明显<sup>[8-9]</sup>。大气凝结水为空气中水分沉降所得,其来源主要是土壤、湖泊和河水的蒸发水分。在这些水源表面水分蒸发过程中,同位素分馏作用首先使分子量较小的<sup>16</sup>O 进入空气,因而,与上述大气水来源的水源相比,大气凝结水的  $\delta^{18}\text{O}$  值最小。植物吸收凝结水后,整体上降低了体内的  $\delta^{18}\text{O}$  值。实验过程中发现,在大气凝结水沉降现象最明显的清晨,艾比湖荒漠中植物的叶片上有明显露珠,表明当地可能存在大气凝结水现象,但收集  $\delta^{18}\text{O}$  的水源样品时,并未收集大气凝结水。因而,后续计算植物体内各水源比例时,并未将  $\delta^{18}\text{O}$  最小的大气凝结水设置为植物体内的潜在水源。利用同位素技术分析植物体内水分来源时,一种水源缺失,会在结果中增加与它  $\delta^{18}\text{O}$  值较接近水源在植物体内占总水分的比例。采集的河水、土壤水和地下水这几个水源中,地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  值最偏负,是最接近大气凝结水的水源类型。因此,计算植物体内各水源的比例时,由于未测定大气凝结水  $\delta^{18}\text{O}$  值,无形中就提高了地下水占植物体内水分的比例。地下水占植物体内的比例为 24.4%—90.2%(表 1),这一数值和其他地区的研究结果相比<sup>[12,21,24,31]</sup>,数值较高。这在一定程度上说明,凝结水对植物的影响,使地下水占植物体内水分的比例较高,也说明,艾比湖湿地自然保护区内的荒漠优势植物,可能存在吸收大气凝结水的现象。另外,大气凝结水除被植物吸收利用外,其又可补给表层土壤水,使得表层土壤水的变化幅度相对深层较大。这在文章研究结果中,也有所证明:土壤容积含水量的误差(*SD*)值随土壤深度增加而降低(图 1),较其余土层,0—40 cm 土层的容积含水量变化幅度最大。这在一定程度上也说明,大气凝结水可能在艾比湖湿地自然保护区中存在。但截至目前,植物利用大气凝结水的现象,仅在少数学者的研究中得到佐证,如在降水补给较少或几乎没有的海岸沙漠地区,植物可将凝结水作为其主要的水源<sup>[8-9]</sup>。但对于干旱区荒漠,该现象还待进一步的验证。

**致谢:**感谢杨军、李尝君和孙景鑫同学在野外采样中帮忙。感谢中国林业科学院稳定性同位素实验室的柯渊研究员予以的同位素测定帮助。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [ 2 ] Dawson T E, Ehleringer J R. Plants, isotopes and water use: a catchment-scale perspective// Kendall C, McDonnell J J, eds. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1998: 165-202.
- [ 3 ] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, Templer P H, Tu K P. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 507-559.
- [ 4 ] Saugier B, Ehleringer J R, Hall A E, Farquhar G D. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2012.
- [ 5 ] 曹燕丽, 卢琦, 林光辉. 氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景. *生态学报*, 2002, 22(1): 111-117.
- [ 6 ] 孙双峰, 黄建辉, 林光辉, 赵威, 韩兴国. 稳定同位素技术在植物水分利用研究中的应用. *生态学报*, 2005, 25(9): 2362-2371.
- [ 7 ] Meißner M, Köhler M, Schwendenmann L, Hölscher D, Dyckmans J. Soil water uptake by trees using water stable isotopes ( $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) a method test regarding soil moisture, texture and carbonate. *Plant and Soil*, 2014, 376(1/2): 327-335.
- [ 8 ] Burgess S S O, Dawson T E. The contribution of fog to the water relations of *Sequoia sempervirens* (D. Don): foliar uptake and prevention of dehydration. *Plant, Cell & Environment*, 2004, 27(8): 1023-1034.
- [ 9 ] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation. *Oecologia*, 1996, 107(1): 13-20.
- [ 10 ] Walker C D, Lance R C M. The fractionation of  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  in leaf water of barley. *Functional Plant Biology*, 1991, 18(4): 411-425.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 刘树宝, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 任志国. 黑河下游不同林龄胡杨水分来源的 D、 $^{18}\text{O}$  同位素示踪. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 988-995.
- [ 13 ] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 25-51.
- [ 14 ] Wershaw R L, Friedman I, Heller S J, Frank P A. Hydrogen isotopic fractionation of water passing through trees//Hobson G D, Speers G C, Inderson D E, eds. *Advances in Organic Geochemistry*. New York: Pergamon Press, 1966: 55-67.
- [ 15 ] Bauerle T L, Richards J H, Smart D R, Eissenstat D M. Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. *Plant, Cell & Environment*, 2008, 31(2): 177-186.

- [16] 戴岳, 郑新军, 唐立松, 李彦. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1214-1225.
- [17] 彭刚, 赵成义, 李君, 韩明, 李菊艳. 新疆塔里木河胡杨根蘖苗水分来源初探. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1093-1099.
- [18] 周海, 郑新军, 唐立松, 李彦. 准噶尔盆地东南缘多枝怪柳、白刺和红砂水分来源的异同. 植物生态学报, 2013, 37(7): 665-673.
- [19] 褚建民. 干旱区植物的水分选择性利用研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [20] Ohte N, Koba K, Yoshikawa K, Sugimoto A, Matsuo N, Kabeya N, Wang L H. Water utilization of natural and planted trees in the semiarid desert of Inner Mongolia, China. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 337-351.
- [21] 郑肖然, 赵国琴, 李小雁, 李柳, 吴华武, 张思毅, 张志华. 氢同位素在内蒙古小叶锦鸡儿灌丛水分来源研究中的应用. 植物生态学报, 2015, 39(2): 184-196.
- [22] 容丽, 王世杰, 俞国松, 邓晓琪, 冉景丞. 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. 林业科学, 2012, 48(7): 14-22.
- [23] 杜雪莲, 王世杰, 罗绪强. 黔中喀斯特石漠化区不同小生境常见木本植物水分来源特征. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1168-1176.
- [24] 朱建佳, 陈辉, 邢星, 陈同同. 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. 地理研究, 2015, 34(2): 285-292.
- [25] 杨晓东. 胡杨、梭梭的植物根系—土壤水分再分配及调控机理[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011.
- [26] 马金珠, 黄天明, 丁贞玉, Edmunds W M. 同位素指示的巴丹吉林沙漠南缘地下水补给来源. 地球科学进展, 2007, 22(9): 922-930.
- [27] Yang X D, Zhang X N, Lü G H, Ali A. Linking *populus euphratica* hydraulic redistribution to diversity assembly in the arid desert zone of Xinjiang, China. *PLoS One*, 2014, 9(10): e109071.
- [28] 杨晓东, 吕光辉, 田幼华, 杨军, 张雪梅. 新疆艾比湖湿地自然保护区植物的生态分组. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2489-2494.
- [29] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [30] Phillips D L, Newsome S D, Gregg J W. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods. *Oecologia*, 2005, 144(4): 520-527.
- [31] 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.
- [32] 杨小林, 张希明, 李义玲, 李绍才, 孙海龙. 塔克拉玛干沙漠腹地 3 种植物根系构型及其生境适应策略. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1268-1276.
- [33] 王珺, 刘茂松, 盛晟, 徐驰, 刘小恺, 王汉杰. 干旱区植物群落土壤水盐及根系生物量的空间分布格局. 生态学报, 2008, 28(9): 4120-4127.
- [34] Ehleringer J R, Roden J, Dawson T E. Assessing ecosystem-level water relations through stable isotope ratio analyses//Ostvaldo E S, Robert B J, Harold A M, Robert W H, eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer, 2000: 181-198.