

贝壳堤岛不同生境下柽柳水分来源比较

朱金方^{1,2,3} 刘京涛^{2*} 孙景宽² 赵艳云² 陆兆华^{2,3} 李俊生¹

(¹中国环境科学研究院生物多样性研究中心, 北京 100012; ²滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东滨州 256600; ³中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083)

摘要 柽柳是黄河三角洲贝壳堤岛内主要的优势物种之一, 在贝壳堤岛上分布范围最为广泛。为确定柽柳的水分利用方式, 选择了 2 个不同生境(近海侧和滩脊)进行比较研究。该研究以稳定同位素技术为主要手段, 测定了不同生境和降水条件下土壤含水量、含盐量及潜在水源和柽柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 并利用 IsoSource 软件计算各潜在水源对柽柳木质部水分的平均贡献率。结果表明: 在降雨充沛的 2013 年 7 月, 近海侧柽柳木质部水中 90.9% 来源于 20~40 cm 土壤水, 而滩脊柽柳木质部水中 51.2% 来源于 60~100 cm 土壤水; 在降雨量较低的 2014 年 7 月, 近海侧柽柳木质部水的 58.4% 来源于 20~60 cm 土壤水, 而滩脊柽柳 67.0% 木质部水来源于浅层地下水; 由于受土壤水盐含量的影响, 近海侧柽柳的水分来源较滩脊柽柳浅。因此, 在不同生境和降雨条件下, 柽柳的主要水分来源明显不同。研究表明, 柽柳能通过改变自身的主要水分来源适应生境和降水条件的变化, 柽柳的这种水源变换能力有利于提高其在种间竞争中的竞争优势, 同时对于逆境条件下贝壳堤岛生态系统稳定性的维持具有重要意义。

关键词 柽柳; 水分来源; 氧稳定同位素; 贝壳堤岛

Water sources for *Tamarix chinensis* Lour. in different habitats on Chenier Island. ZHU Jin-fang^{1,2,3}, LIU Jing-tao^{2*}, SUN Jing-kuan², ZHAO Yan-yun², LU Zhao-hua^{2,3}, LI Jun-sheng¹ (¹Biodiversity Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; ²Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256600, Shandong, China; ³Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China).

Abstract: *Tamarix chinensis* is one of dominant species and widely distributed in the Chenier Island of the Yellow River Delta. To detect the water use patterns of *T. chinensis*, we conducted a comparative study at two habitats, seaside and dune crest. Soil moisture, soil salinity and oxygen isotope compositions in the xylem water of *T. chinensis* were measured during two plant growth seasons. The IsoSource model was used to calculate the feasible contributions of potential water sources to *T. chinensis* xylem water. In July 2013 with high precipitation, 90.9% of the xylem water in *T. chinensis* at the seaside was from the 20–40 cm soil layer, while 51.2% of the xylem water at the dune crest was from the 60–100 cm soil layer. In July 2014 with low precipitation, 58.4% of the xylem water at the seaside was from the 20–60 cm soil layer and 67.0% of the water at the dune crest from shallow groundwater. In addition, *T. chinensis* at the dune crest took up deeper water source than at the seaside because of the difference of soil and groundwater salinity. Thus, the water sources of *T. chinensis* varied with habitats and precipitation. These results suggested that *T. chinensis* could adapt to variable habitats and precipitation by altering the water use patterns, which benefits its competition capability for water resources and the maintenance of ecosystem stability of the Chenier Island under stresses.

Key words: *Tamarix chinensis* Lour.; water source; oxygen stable isotope; Chenier Island.

在自然生态系统中,由于植物种类差异和生境中环境因素的影响,植物根系在土壤中的分布格局不同,从而导致不同或同一物种间水分来源产生差异(Ehleringer *et al.*, 1991; Dawson *et al.*, 1996; Chimer *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2005)。植物的水分来源和植物的根系分布并非完全一致,与环境中可利用水的量密切相关(Ehleringer *et al.*, 1992; Ewe *et al.*, 2002, 2007)。植物水分来源的变化是其对环境中水分条件变化的一种适应机制(方杰等, 2011; Xu *et al.*, 2011; Dai *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2016)。在湿季,植物主要吸收利用靠降雨补充的浅层土壤水,而在干季,由于降雨缺乏,土壤水分不足,植物利用深根系吸收深层土壤水或地下水来满足其本身对水分需求(Ewe *et al.*, 2002, 2007; Yang *et al.*, 2011)。Wu 等(2014)在对沙漠植物水分利用策略的研究中发现,多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)在湿润的春季能够从各层土壤中均匀吸收水分,而在干旱的夏季和秋季,则主要以深层土壤水为主。稳定同位素技术精确性和灵敏性的特点,为植物水分来源的研究提供了一种新的技术手段(Ehleringer *et al.*, 1992; Schwinning *et al.*, 2005; Cook *et al.*, 2006; Duan *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2011; 冯建祥等, 2013)。前期研究表明,盐生和旱生植物在水分吸收过程中,氢稳定同位素(D)会发生分馏(Lin *et al.*, 1993; Ellsworth *et al.*, 2007)。因此,在本研究中主要以氧稳定同位素(^{18}O)为主要示踪指标。

怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)作为一种典型的耐盐旱植物,在中国分布较为广泛,从西部荒漠生态系统到北方滨海生态系统均有分布,具有防风固沙、防潮固堤的重要作用(刘发民等, 2001; Cui *et al.*, 2010; 朱金方等, 2013; Zhang, 2014)。在黄河三角洲贝壳堤岛内,怪柳是主要的优势灌木,分布区域最为广泛,遍布整个研究区(赵艳云等, 2011)。在贝壳堤岛,由于土壤颗粒中大粒径颗粒所占比重高,土壤孔隙大,持水保肥能力弱,土壤含水量低,因此水分成为限制该地区植被分布和物种组成的关键环境因子(Zhao *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2016)。目前,对于该地区怪柳的研究主要集中在耐盐旱机理(朱金方

等, 2012, 2013)、光合特性(夏江宝等, 2009)及分布特征(赵艳云等, 2011)等方面,而对怪柳水分来源方面的研究较少(朱金方等, 2015)。作为贝壳堤岛内的优势灌木,研究怪柳的水分利用策略对于维持生态系统结构和功能的稳定具有重要的意义。通过比较不同生境中随降水条件变化怪柳木质部水与其潜在水源(土壤水、地下水)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,分析怪柳的主要水分来源,定量研究不同生境中随降水条件变化怪柳的水分来源的变化,揭示不同生境下怪柳的水分适应机制,为黄河三角洲贝壳堤湿地植被的恢复以及全球气候变化影响下群落演替趋势的预测提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区内的汪子岛,地理位置为 $38^{\circ}5'51''\text{N}$ — $38^{\circ}21'6''\text{N}$ 、 $117^{\circ}46'58''\text{E}$ — $118^{\circ}5'43''\text{E}$ 。该区气候属暖温带东亚季风大陆性半湿润气候,年均降水量为 550 mm,降雨集中在 6—9 月份(占全年降水量的 70%以上),年平均蒸发量为 2430.6 mm,年平均气温 12.4°C (夏江宝等, 2013; 朱金方等, 2015)。贝壳堤岛地势低平,海拔在 5 m 以下,地下水埋藏浅(1~2 m)、矿化度高,土壤为滨海盐渍土,成土母质主要是风积物和钙质贝壳土壤化,土壤类别主要是滨海盐土类和贝壳砂土类(朱金方等, 2015)。

1.2 样地设置与样品采集

在研究区内根据怪柳的分布情况,于贝壳堤滩脊和近海侧各设置 1 个 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的固定样地。滩脊样地中,怪柳冠下伴生植物为蒙古蒿(*Artemisia mongolica* (Fisch. ex Bess.) Nakai.)、青蒿(*Artemisia carrifolia* Buch.)等草本植物;近海侧样地中,怪柳灌下伴生植物较少,稀疏分布有二色补血草(*Limonium bicolor* (Bag.) Kuntze)、砂引草(*Messerschmidia sibirica* Linn.)、大穗结缕草(*Zoysia macrostachya* Franch.)等草本植物。不同生境下植被类型基本状况如表 1 所示。

分别选择 2013 年 7 月(月降雨量为 293.3 mm)

表 1 不同生境下植被类型的基本状况
Table 1 Vegetation distribution in different habitats

| 生境 | 植被类型 | 覆盖度(%) | 典型植物 | 怪柳优势度 | 怪柳重要值 | 平均树高(m) |
|-----|------|--------|--------------|-------|-------|---------|
| 近海侧 | 盐生灌木 | 55 | 怪柳、二色补血草、砂引草 | 1.00 | 0.91 | 1.58 |
| 滩脊 | 旱生灌木 | 90 | 怪柳、蒙古蒿、青蒿 | 1.00 | 0.83 | 2.15 |

和2014年7月(月降雨量为32.6 mm)为采样期,采样时间均为当月底。

在每个样地中,分别选择3株生长旺盛的怪柳,在其阳面中部剪截取一段5 cm完全木栓化的枝条,去掉韧皮部,保留木质部,每个样地采集3个重复。在怪柳样株0.5~1.0 m范围内,用直径4.5 cm的特制土钻分别从0~20、20~40、40~60、60~100 cm 4个层面采集土壤样品,每层取3个重复。在样地内,埋设2 m深的陶土管,采集浅层地下水,每次取3个重复。所有样品采集后立即装入带塞的取样瓶中并用Parafilm封口,植物和土壤样品在-10℃下冷藏贮存,地下水样在4℃下贮存。

1.3 样品的提取和测定

在山东省黄河三角洲生态环境重点实验室采用真空冷冻抽提技术(Ehleringer *et al.*, 1991)提取植物木质部和土壤中的水分。地下水采用相同方法进行提取,以去除样品中的盐分,防止堵塞设备管路。提取样品水的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值采用液态水同位素分析仪(LWIA, DLT-100, Los Gates Research Inc., Mountain View, CA, USA)进行测定,并采用Schultz等(2011)的方法对植物样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行矫正。 $\delta^{18}\text{O}$ 指氧元素样品中的稳定同位素的比值相对于某种标准样品对应比值的千分差值,其表达公式如下(徐庆等,2007):

$$d^{18}\text{O} = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中: $R_{\text{样品}}$ 为样品中 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 的值, $R_{\text{标准}}$ 为标准平均海水中的比值, $\delta^{18}\text{O}$ 的单位为‰。

土壤含水量采用烘干法进行测定,并用如下公

式计算:
$$\text{土壤含水量}(\%) = [\text{湿土重}(\text{g}) - \text{干土重}(\text{g})] / \text{干土重}(\text{g}) \times 100\%$$

土壤含盐量的测定采用称重法。

1.4 数据处理

采用SPSS 17.0对数据进行相关分析,并使用Duncan法进行数据的多重比较,分析土壤含水量、含盐量、各潜在水源 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异显著性。利用Iso-Source混合模型(Phillips *et al.*, 2003, 2005)计算潜在水源对怪柳木质部水分的贡献率(<http://www.epa.gov/wed/pages/models/stableIsotopes/isosource/isosource.htm>),模型参数增量为1%,质量平衡公差为0.05‰。采用Origin 8.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量变化

近海侧与滩脊土壤含水量在不同降水条件下的垂直分布特征如图1所示。近海侧怪柳灌丛下土壤含水量在2013年7月和2014年7月均具有较为明显的垂直梯度变化,随着土壤深度增加土壤含水量显著增加($P<0.05$);而在滩脊怪柳灌丛下,2013年7月和2014年7月土壤含水量垂直梯度变化较小,平均土壤含水量分别为6.87%、1.82%,且各层土壤含水量均显著低于同月份近海侧土壤含水量($P<0.05$)。

2.2 土壤和地下水含盐量变化

图2所示,在2013年7月,近海侧怪柳灌丛下土壤含盐量随着土壤深度的增加呈逐渐升高趋势,

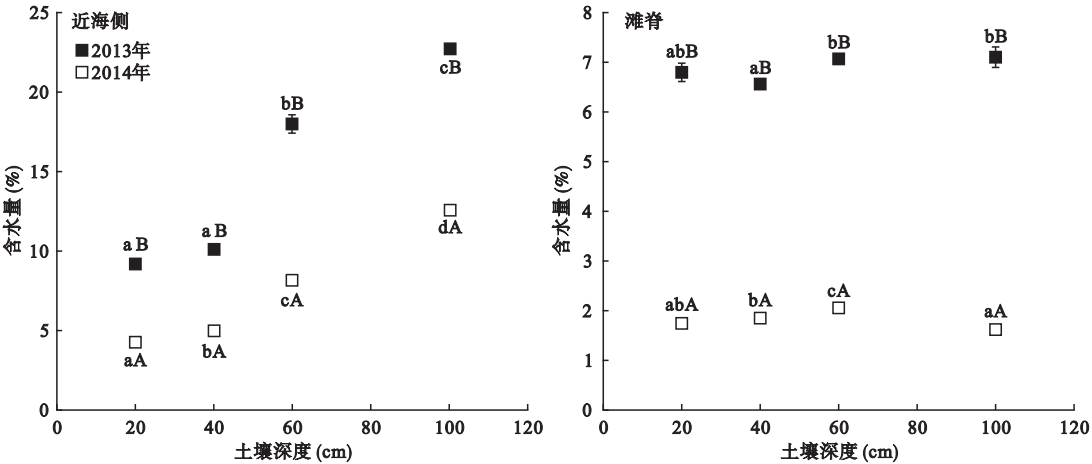


图1 不同生境下土壤含水量变化特征
Fig.1 Changes of soil water content at different habitats
不同小写字母表示不同深度土壤含水量之间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一深度2013、2014年土壤含水量之间差异显著($P<0.05$)。

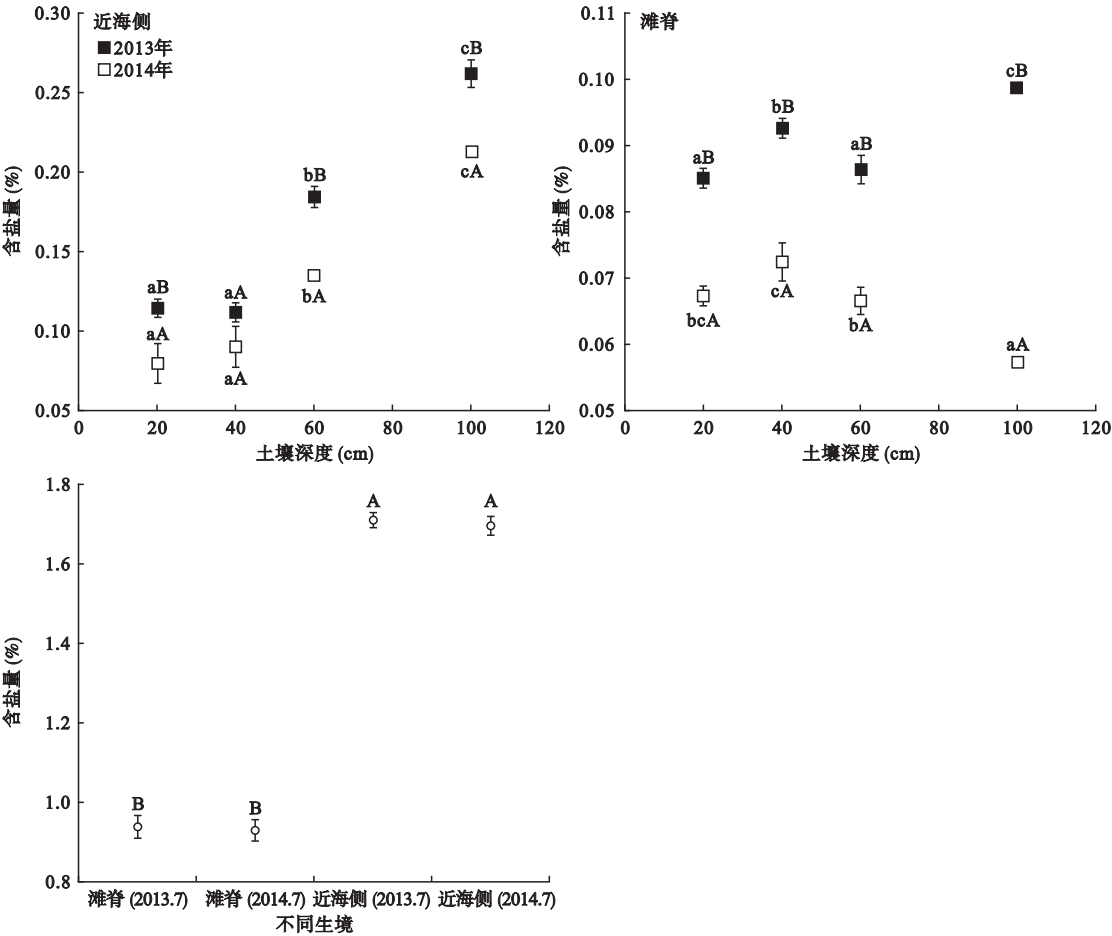


图 2 不同生境下土壤、地下水含盐量变化

Fig.2 Salinities of soil and groundwater at different habitats

不同小写字母表示不同深度土壤含盐量之间差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示同一深度 2013 年与 2014 年土壤 (地下水) 含盐量之间差异显著 ($P<0.05$)。

变化范围为 0.113%~0.262%。0~20 与 20~40 cm 土壤含盐量无显著差异 ($P>0.05$), 但均显著低于 40~60 和 60~100 cm 土壤含盐量 ($P<0.05$); 滩脊柽柳灌丛下土壤含盐量随着土壤深度虽有一定增加, 但与近海侧相比变化幅度较小 (0.085%~0.098%), 各层土壤含盐量均显著低于近海侧 ($P<0.05$), 60~100 cm 土壤含盐量仅为 0.098%。在 2014 年 7 月, 近海侧土壤含盐量垂直变化趋势与 2013 年相似, 但土壤含盐量显著低于 2013 年 ($P<0.05$); 滩脊柽柳灌丛下土壤含盐量随土壤深度增加呈先升高后降低趋势, 0~20 cm 土壤含盐量与 20~40、40~60 cm 土壤含盐量均无显著差异 ($P>0.05$), 60~100 cm 土壤含盐量 (0.057%) 显著低于上层土壤 (0~60 cm) 含盐量 ($P<0.05$); 与 2013 年相比, 滩脊柽柳灌丛下各层土壤含盐量均显著降低 ($P<0.05$), 且与近海侧含盐量之间差异显著 ($P<0.05$)。2013 年 7 月和 2014 年 7 月地下水含盐量无显著差异 ($P>0.05$), 近海侧

地下水含盐量显著高于滩脊地下水 ($P<0.05$)。

2.3 各潜在水源及柽柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

不同生境下各潜在水源及柽柳木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在不同降水条件下的变化特征如图 3 所示。在 2013 年 7 月, 近海侧柽柳灌丛下, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随深度的增加而显著升高, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为 -8.96‰ ~ -4.96‰ , 各层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间差异显著 ($P<0.05$), 柽柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 20~40 cm 土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间无显著差异 ($P>0.05$); 而滩脊柽柳灌丛下, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围较小 (-9.56‰ ~ -8.23‰), 各层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与近海侧相比差异显著 ($P<0.05$), 柽柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于地下水和 60~100 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间, 且与地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值无显著差异 ($P>0.05$)。在 2014 年 7 月, 近海侧和滩脊柽柳灌丛下, 各潜在水源和柽柳木质部水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较 2013 年 7 月均显著富集 ($P<0.05$); 近海侧土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围为 -4.55‰ ~

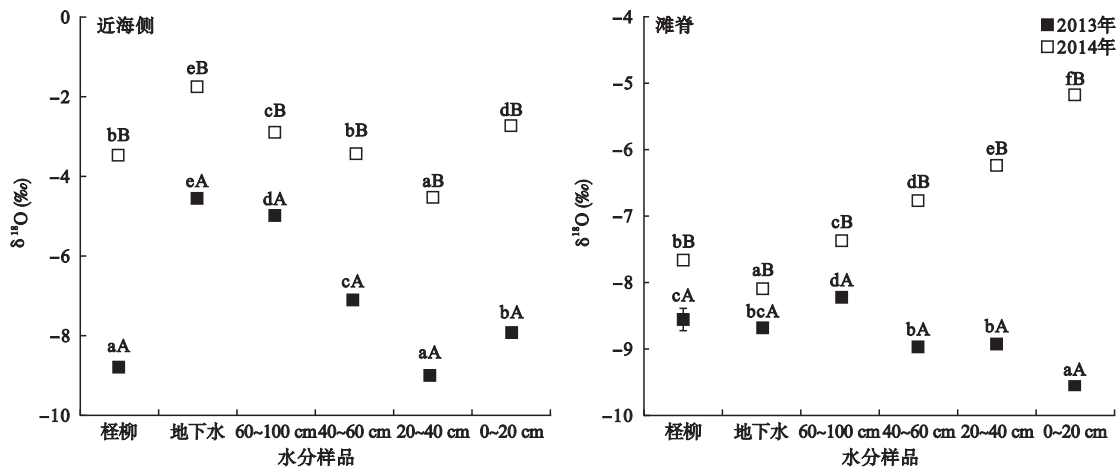


图 3 不同生境下各潜在水源及植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Fig.3 $\delta^{18}\text{O}$ values of potential water sources and plant xylem water at different habitats

不同小写字母表示 2013 年(2014 年)各潜在水源和植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间差异显著 ($P<0.05$);不同大写字母表示 2013 年与 2014 年各水源和植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同生境下桤柳对各潜在水源的利用比例 (%)

Table 2 Proportions of potential water sources (%) for *Tamarix chinensis* Lour. at different habitats

| 水分来源 | 近海侧 | | 滩脊 | |
|------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| | 2013.7 | 2014.7 | 2013.7 | 2014.7 |
| 土壤深度 | 0~20 cm | 5.0 (0~20) | 6.2 (0~28) | 3.4 (0~16) |
| | 20~40 cm | 90.9 (80~97) | 12.0 (0~54) | 5.8 (0~25) |
| | 40~60 cm | 2.4 (0~10) | 11.8 (0~52) | 8.2 (0~35) |
| | 60~100 cm | 0.9 (0~5) | 51.2 (17~78) | 15.6 (0~65) |
| 地下水 | 0.8 (0~4) | 9.5 (0~40) | 18.8 (0~83) | 67.0 (35~87) |

括号外数值为平均值,括号内为(最小值~最大值)。

-2.74‰,各层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的垂直分布趋势与 2013 年 7 月近似,桤柳木质部水分 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 40~60 cm 土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值无显著差异 ($P>0.05$);而滩脊土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土壤深度增加呈降低趋势,各层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间差异显著 ($P<0.05$),且显著低于近海侧土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($P<0.05$),桤柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于地下水和 60~100 cm 土壤水之间。

2.4 桤柳对各潜在水源的利用比例

不同生境下桤柳随降水条件变化对各潜在水源的利用比例变化如表 2 所示。在 2013 年 7 月,近海侧桤柳吸收利用的水分几乎全部来源于 20~40 cm 土壤水(90.9%),对其他各层土壤水和浅层地下水的利用比例较小;滩脊桤柳的水分来源主要为 60~100 cm 土壤水和浅层地下水,其中 51.2%的水分来源于 60~100 cm 土壤水,对浅层地下水的利用比例为 18.8%。在 2014 年 7 月,由于降雨量大幅度减少,各层土壤含水量降低,近海侧桤柳对 20~40 cm 土壤水的利用比例相比 2013 年降低 58.0%,对其他各层土壤水和浅层地下水的利用比例均有所增加,其中主要以 20~60 cm 土壤水为主要水源(58.4%);

而滩脊桤柳对土壤水的利用比例仅为 33.0%,地下水(67.0%)替代土壤水成为其主要水分来源。

3 讨论

土壤水一般主要通过降雨、地表径流或地下水来补充(Gazis *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2012)。在黄河三角洲贝壳堤湿地内,降雨是该地区主要的淡水补充源,2013 年 7 月降雨量较大,各层土壤水均得到补充,而 2014 年 7 月降雨量较低,导致土壤含水量显著降低。土壤盐分与降雨淋洗、植物吸收及盐分输入等过程密切相关(朱宏伟等, 2013)。降雨淋洗可显著降低土壤盐分,Isidoro 和 Grattan 发现,降雨对砂土盐分的淋洗效果要比对黏土的淋洗效果更好(Isidoro *et al.*, 2011)。桤柳作为一种泌盐植物,能够吸收土壤中的盐分,有效降低土壤含盐量(雷金银等, 2011)。在黄河三角洲沿海地区,土壤盐分来源主要为风暴潮和地下水(张国明等, 2006),而在贝壳堤湿地土壤质地为砾质土,土壤非毛管孔隙大,土壤毛细管作用较弱,含盐地下水较难通过毛细管作用进入到上层土壤中(Xie *et al.*, 2012; 朱金方等,

2015),因此,该区域土壤盐分主要来自风暴潮。本研究发现,不同生境下2014年7月各层土壤含盐量均显著低于2013年7月,主要是由于怪柳对盐分的吸收和降雨的淋洗降低了土壤盐分,同时在两次采样期间没有发生较大风暴潮灾害,缺少盐分的输入。在滩脊怪柳灌丛下,60~100 cm土壤含盐量显著低于上层土壤含盐量,这是由于怪柳的根系主要分布在50~150 cm的土壤中,因此其对60~100 cm土壤盐分吸收量相对较高;相反,在近海侧怪柳灌丛下,土壤含盐量随深度增加显著增加,主要是由于海水涨潮后对不同深度土壤水平渗透程度不同所导致的。

土壤水稳定同位素组成与降雨、地表蒸发等过程有关(Gazis *et al.*, 2004)。降雨在形成的过程中,由于 ^{18}O 移动性较弱且形成的水分子具有较强的结合能,地表水蒸发后在空气中形成的水汽 ^{18}O 较为贫化,因此雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般低于地表水汽蒸发源,而降雨在土壤中的渗透过程使得土壤水稳定同位素组成产生差异(Zhang *et al.*, 2005; Gu *et al.*, 2015)。本文研究结果显示,2013年7月近海侧和滩脊怪柳灌丛下各层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均显著低于2014年7月土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,表明在2013年7月降雨量大于蒸发量,土壤水受雨水影响 ^{18}O 发生贫化,而在2014年7月降雨量较低,土壤水 ^{18}O 因蒸发而引起的富集作用强于降雨造成的贫化。一般情况下,随着土壤深度的加深,因蒸发而引起的同位素富集程度越低(Shurbaji *et al.*, 1997; Cui *et al.*, 2015)。本文研究结果中,2014年7月滩脊怪柳灌丛下土壤水稳定同位素氧的剖面分布情况与该结论相一致,但近海侧怪柳灌丛下40~100 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在2013年7月和2014年7月均显著高于0~40 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,这主要是由于海水中 ^{18}O 富集程度一般较高(2013年7月,海水 $\delta^{18}\text{O} \approx -6.0\text{‰}$; 2014年7月,海水 $\delta^{18}\text{O} \approx -2.0\text{‰}$),而近海侧样地位于高潮线附近,涨潮时海水水平渗透到样地下层土壤中,所以使得近海侧土壤水和地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高。此外,近海侧怪柳灌丛下20~40 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在干季、湿季均显著低于表层,认为主要有2个原因:一是0~20 cm土壤受蒸发影响程度比20~40 cm高;二是0~20 cm土层大粒径贝壳砂(>2.0 mm)占土壤颗粒比重较高(朱金方等, 2015),土壤持水能力弱,雨水大部分进入到20~40 cm土层中,使得该层土壤水氧稳定同位素发生贫化。

随着环境中植物可以用水资源在时间或空间上的变化,植物将会采用不同的水分利用策略来应对这种变化所产生的水分胁迫(Stratton *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2014; Gu *et al.*, 2015)。在海岸带生态系统中,植物的水分利用策略除受降雨影响外还受潜在水源含盐量的影响。Ewe等(2007)在对滨海湿地植物水分利用策略的研究中发现,在降雨丰富的湿季,表层土壤中以淡水为主,植物的水分全部来自于表层土壤水;而在干季,土壤含盐量增加,植物吸收利用土壤水和地下水的混合水。周雅聃等(2011)在对干旱区荒漠植物水分利用策略的研究中发现,植物在降水量较高的地区主要以利用浅层土壤水为主,而在降水量相对较低的地区,则以深层土壤水和地下水为主。植物木质部水是其潜在水源的混合水,因此不同生境怪柳木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在不同降水条件下表现出显著的差异性。前期研究表明,通过比较植物木质部水与各潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,可以确定植物的水分来源(Dawson *et al.*, 1996; Ewe *et al.*, 2007)。本研究中, IsoSource 结果表明,降雨量丰沛的2013年7月,滩脊怪柳对60~100 cm土壤水的利用比例较高,而对0~60 cm土壤水和浅层地下水的吸收较少;而在近海侧,由于下层土壤含盐量相对较高,怪柳优先选择利用上层含盐量较低的土壤水,其中绝大部分来源于20~40 cm土壤水,表明盐分对怪柳吸收水分的利用有显著影响。2个生境下怪柳主要水分来源的差异与怪柳的根系分布密切相关(Nippert *et al.*, 2010; Cui *et al.*, 2015),主要由于近海侧深层土壤盐分显著高于滩脊,这限制近海侧怪柳根系向深处的生长。在降雨量较少的2014年7月,土壤含水量降低,近海侧怪柳由原来的对单一土层土壤水的集中利用转变为对多层土壤水的利用,以此获得足够的水分来满足生长的需求;而滩脊怪柳灌丛下,土壤含水量降低至极低水平,仅依靠土壤水已无法满足怪柳生理需求,因此怪柳的主要水源由土壤水转换为含盐量较低的浅层地下水。在贝壳堤岛研究区内,怪柳的伴生植物主要为浅根系草本植物(赵艳云等, 2011),在土壤水缺少的季节,怪柳这种主要水分来源的转变,避免了与其伴生植物之间的水分竞争,有利于浅根系植物的生长,促进贝壳堤岛内物种间的共存,提高了生态系统在逆境条件下的稳定性。同时,不同生境下随水分条件变化怪柳水分来源的转变,有利于增强怪柳对水资源多变环境的适应能力,提高生态系统中水资源

源的利用效率。

综上所述,贝壳堤岛不同生境下怪柳的水分利用策略不同,近海侧怪柳水分利用来源深度较浅,而滩脊怪柳水分利用来源深度相对较深。在降雨不足的情况下,近海侧和滩脊生境下的怪柳均能通过增加水分来源深度的方式来应对水分胁迫。怪柳在不同生境下和不同降水条件下水分来源的差异,表明其具有较强的调节水分吸收和环境适应能力。

参考文献

方杰,魏雅芬,刘帅,等. 2011. 科尔沁沙地丘间低地樟子松人工林水分利用来源的稳定同位素解析. 生态学杂志, **30**(9): 1894–1900.

冯建祥,黄敏参,黄茜,等. 2013. 稳定同位素在滨海湿地生态系统研究中的应用现状与前景. 生态学杂志, **32**(4): 1065–1074.

雷金银,班乃荣,张永宏,等. 2011. 怪柳对盐碱土养分与盐分的影响及其区化特征. 水土保持通报, **31**(2): 73–76.

刘发民,金燕,张小军. 2001. 荒漠地区怪柳人工固沙林土壤水分动态研究. 西北植物学报, **21**(5): 937–943.

夏江宝,田家怡,张光灿,等. 2009. 黄河三角洲贝壳堤岛3种灌木光合生理特征研究. 西北植物学报, **29**(7): 1452–1459.

夏江宝,张淑勇,王荣荣,等. 2013. 贝壳堤岛3种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征. 生态学报, **33**(21): 7013–7022.

徐庆,刘世荣,安树青,等. 2007. 四川卧龙亚高山暗针叶林土壤水的氢稳定同位素特征. 林业科学, **43**(1): 8–14.

张国明,顾卫,吴之正,等. 2006. 渤海湾风暴潮倒灌对沿岸农田土壤盐分的影响. 地球科学进展, **21**(2): 157–160.

赵艳云,胡相明,刘京涛,等. 2011. 黄河三角洲贝壳堤岛植被特征分析. 水土保持通报, **31**(2): 177–180, 185.

周雅聃,陈世苹,宋维民,等. 2011. 不同降水条件下两种荒漠植物的水分利用策略. 植物生态学报, **35**(8): 789–800.

朱宏伟,夏军,曹国栋,等. 2013. 盐渍化其耕地土壤盐分动态及其影响因素. 土壤, **45**(2): 339–345.

朱金方,刘京涛,陆兆华,等. 2015. 黄河三角洲贝壳堤岛怪柳水分利用策略初步研究. 湿地科学, **13**(12): 765–771.

朱金方,陆兆华,夏江宝,等. 2013. 盐旱交叉胁迫对怪柳幼苗渗透调节物质含量的影响. 西北植物学报, **33**(2): 357–363.

朱金方,夏江宝,陆兆华,等. 2012. 盐旱交叉胁迫对怪柳幼苗生长及生理生化特性的影响. 西北植物学报, **32**(1): 124–130.

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 USA. *Plant and Soil*, **260**: 225–236.

Cook PG, O'Grady AP. 2006. Determining soil and ground water use of vegetation from heat pulse, water potential and stable isotope data. *Oecologia*, **148**: 97–107.

Cui BS, Yang QC, Zhang KJ, et al. 2010. Responses of saltcedar (*Tamarix chinensis*) to water table depth and soil salinity in the Yellow River Delta, China. *Plant Ecology*, **209**: 279–290.

Cui Y, Ma J, Sun W, et al. 2015. A preliminary study of water use strategy of desert plants in Dunhuang, China. *Journal of Arid Land*, **7**: 73–81.

Dai Y, Zheng XJ, Tang LS, et al. 2015. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert. *Plant and Soil*, **389**: 73–87.

Dawson TE, Pate JS. 1996. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation. *Oecologia*, **107**: 13–20.

Duan DY, Ouyang H, Song MH, et al. 2008. Water Sources of dominant species in three alpine ecosystems on the Tibetan Plateau, China. *Journal of Integrative Plant Biology*, **50**: 257–264.

Ehleringer JR, Dawson TE. 1992. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, **15**: 1073–1082.

Ehleringer JR, Phillips SL, Schuster WSF, et al. 1991. Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia*, **88**: 430–434.

Ellsworth PZ, Williams DG. 2007. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant and Soil*, **291**: 93–107.

Ewe S, Sternberg LdaSL. 2002. Seasonal water-use by the invasive exotic, *Schinus terebinthifolius*, in native and disturbed communities. *Oecologia*, **133**: 441–448.

Ewe SM, Sternberg LdaSL, Childers DL. 2007. Seasonal plant water uptake patterns in the saline southeast Everglades ecotone. *Oecologia*, **152**: 607–616.

Gazis C, Feng XH. 2004. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, **119**: 97–111.

Gu D, Zhang Z, Mallik A, et al. 2015. Seasonal water use strategy of *Cyclobalanopsis glauca* in a karst area of southern China. *Environmental Earth Sciences*, **74**: 1007–1014.

Isidoro D, Grattan SR. 2011. Predicting soil salinity in response to different irrigation practices, soil types and rainfall scenarios. *Irrigation Science*, **29**: 197–211.

Lin G, Sternberg LdaSL. 1993. Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants.// Ehleringer JR, Hall AE, Farquhar JD, eds. *Stable Isotopes and Plant Carbon-water Relation*. San Diego: Academic Press: 497–510.

Nippert JB, Butler JJ, Kluitenberg GJ, et al. 2010. Patterns of *Tamarix* water use during a record drought. *Oecologia*,

- 162**: 283–292.
- Oliveira RS, Dawson TE, Burgess SSO, *et al.* 2005. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. *Oecologia*, **145**: 354–363.
- 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.
- Schultz NM, Griffis TJ, Lee XH, *et al.* 2011. Identification and correction of spectral contamination in $^2\text{H}/^1\text{H}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measured in leaf, stem, and soil water. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **25**: 3360–3368.
- Schwinning S, Starr BI, Ehleringer JR. 2005. Summer and winter drought in a cold desert ecosystem (Colorado Plateau). Part I: Effects on soil water and plant water uptake. *Journal of Arid Environments*, **60**: 547–566.
- Shurbaji AR, Campbell AR. 1997. Study of evaporation and recharge in desert soil using environmental tracers, New Mexico, USA. *Environmental Geology*, **29**: 147–151.
- Stratton LC, Goldstein G, Meinzer FC. 2000. Temporal and spatial partitioning of water resources among eight woody species in a Hawaiian dry forest. *Oecologia*, **124**: 309–317.
- Wu H, Li XY, Li J, *et al.* 2016. Differential soil moisture pulse uptake by coexisting plants in an alpine *Achnatherum splendens* grassland community. *Environmental Earth Sciences*, **75**: 1–13.
- Wu Y, Zhou H, Zheng XJ, *et al.* 2014. Seasonal changes in the water use strategies of three co-occurring desert shrubs. *Hydrological Processes*, **28**: 6265–6275.
- Xu Q, Li H, Chen JQ, *et al.* 2011. Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: The deuterium isotope approach. *Ecohydrology*, **4**: 236–244.
- Xu Q, Liu SR, Wan XC, *et al.* 2012. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes*, **26**: 3800–3809.
- Xie W, Zhao Y, Zhang Z, *et al.* 2012. Shell sand properties and vegetative distribution on shell ridges of the Southwestern Coast of Bohai Bay. *Environmental Earth Sciences*, **67**: 1357–1362.
- Yang H, Auerswald K, Bai Y, *et al.* 2011. Complementarity in water sources among dominant species in typical steppe ecosystems of Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*, **340**: 303–313.
- Zhang JF. 2014. Coastal saline soil rehabilitation and utilization based on forestry approaches in China. Berlin: Springer.
- Zhang X, Tian L, Liu J. 2005. Fractionation mechanism of stable isotope in evaporating water body. *Journal of Geographical Sciences*, **15**: 375–384.
- Zhao Y, Hu X, Liu J, *et al.* 2015. Vegetation pattern in shell ridge island in China's Yellow River Delta. *Frontiers of Earth Science*, **9**: 567–577.
- Zhu J, Liu J, Lu Z, *et al.* 2016. Soil-water interacting use patterns driven by *Ziziphus jujuba* on the Chenier Island in the Yellow River Delta, China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, **62**: 1614–1624.

作者简介 朱金方,男,1986年生,博士研究生,研究方向为生态修复。E-mail: zhujinfangcom@163.com
责任编辑 张 敏
