植物生态学报 2013, **37** (12): 1091–1100 doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00112
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

青海湖流域具鳞水柏枝植物水分利用氢同位素示踪研究

赵国琴[1,2] 李小雁[1,2*] 吴华武[2] 张思毅[2] 李广泳[2]

[1]地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; [2]北京师范大学资源学院, 北京 100875

摘 要 具鳞水柏枝(*Myricaria squamosa*)是我国高寒地区广泛分布的优势河谷灌木, 具有维持河谷湿地系统稳定的功能。然而, 目前国内外有关具鳞水柏枝水分利用来源的定量研究很少。该文运用氢稳定同位素示踪方法, 分析了青海湖流域具鳞水柏枝茎(木质部)水和潜在水源(地下水、河水和土壤水)的氢稳定同位素比率(δD)的季节变化, 发现具鳞水柏枝在不同水文环境下的植物水分利用来源有明显差异。研究结果表明, 生长在河岸边的具鳞水柏枝在6、7月主要利用地下水与河水, 分别占其所利用水分的89%、86%和55%、65%, 8月主要利用0–20 cm土层的土壤水, 9月水源不详。生长在离河岸约100 m处的具鳞水柏枝在6月主要利用地下水与河水(91%、70%), 在7–9月以0–60 cm土层的土壤水为主要水源。这表明生长在河岸边的具鳞水柏枝对地下水和河水的依赖程度较高, 而距离河岸约100 m时对土壤水的利用量较多, 反映出生长在不同生境中的具鳞水柏枝对特定水分条件的特殊适应结果。

关键词 氘同位素, 具鳞水柏枝, 植物水分, 青海湖流域, 河谷灌木

Study on plant water use in *Myricaria squamosa* with stable hydrogen isotope tracer in Qinghai Lake basin

ZHAO Guo-Qin[1,2], LI Xiao-Yan[1,2*], WU Hua-Wu[2], ZHANG Si-Yi[2], and LI Guang-Yong[2]

[1]State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing 100875, China; and [2]College of Resources Sciences and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract

Aims Little study has been conducted to quantify plant water sources for *Myricaria squamosa*, which is a dominant alpine riparian shrub in the Qinghai Lake basin and plays a key role in maintaining riverine wetland system. The objective of this study was to quantify water sources for *M. squamosa* growing under different hydrological conditions.

Methods We collected the water samples from the xylem of *M. squamosa*, groundwater, river, and soils in the Qinghai Lake basin from June through September, and analyzed the seasonal variation of hydrogen stable isotope ratio (δD) in the xylem and potential water sources using stable hydrogen isotope tracer method. We then compared the differences in water sources for *M. squamosa* growing under two contrasting hydrological conditions.

Important findings *Myricaria squamosa* plants growing on the river bank mainly used groundwater and water from the river stream in June and July, with groundwater contributing up to 89% of water use in June and 55% in July and river stream contributing up to 86% in June and 65% in July, respectively; whilst in August, they used water mainly from the 0–20 cm soil layer; the water source in September was identifiable. In contrast, *Myricaria squamosa* plants growing approximately about 100 m away from the river bank mainly accessed the groundwater and river water in June (91% and 70%, respectively), and used water from the 0–60 cm soil layer during the rainy months July, August and September. Results suggest that *M. squamosa* plants on the river bank use mainly groundwater and river water; soil water was more important for those far away from the river bank. These are resulted from the responses of this shrub species to specific water conditions when growing under contrasting water regimes.

Key words deuterium isotope, *Myricaria squamosa*, plant water use, Qinghai Lake basin, riparian shrub

河岸植被是河岸生态系统的重要组成部分, 对河谷湿地健康发展至关重要(Mitsch & Gosselink, 2000; 饶良懿和崔建国, 2008)。全球变化及人类活动会导致河流系统变化, 增强河岸带空间异质性,

收稿日期Received: 2013-08-12 接受日期Accepted: 2013-10-28

* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: zhaoguoqin2008@126.com)

从而影响河岸植物的水分利用(Helfield *et al*., 2012), 研究河岸带不同生境下植物水分利用的空间变化, 对于揭示河流动态变化对植被生长的影响至关重要。

氢氧稳定同位素技术已经被广泛应用于河岸植物水分利用研究, 国内外对不同生态系统中的河岸植物用水来源研究已取得较多成果。有研究发现河岸植物并不利用河水, 如在俄勒冈州发现长期储存在土壤中的降水才是河岸树木的稳定水源(Brooks *et al*., 2010); 干旱区和山地河岸树木都不直接利用河水(Dawson & Ehleringer, 1991; Costelloe *et al*., 2008)。同时, 多数研究证明土壤水和地下水能提供给河岸植物稳定的水分和养分条件(Thorburn & Walker, 1994), 然而植物对土壤水和地下水的利用量因降水和季节而不同, 如随干旱不断加剧, 河岸入侵灌木柽柳(*Tamarix*)的水源由地下水转为土壤水(Nippert *et al*., 2010); 河岸湿生树木在雨季吸收浅层土壤水, 而在其他季节利用地下水(Snyder & Williams, 2000); 河岸带二色桉(*Eucalyptus largiflorens*)对浅层土壤水和地下水的利用有所差异(Jolly & Walker, 1996)。国内有关植物水分利用的研究主要针对干旱和半干旱区、亚高山森林及农林系统的植被(Cheng *et al*., 2006; Li *et al*., 2007; 孙守家等, 2010; Xu *et al*., 2011; Yang *et al*., 2011; 朱雅娟等, 2013), 对河岸植物的研究针对同一生态系统中的不同物种(赵良菊等, 2008), 而植物在不同生境中的用水来源差异是研究河流动态影响植被生长的基础, 相关研究却多在半干旱区河岸带(Thorburn & Walker, 1994)开展, 对高寒地区河岸植物的研究较少, 尤其对高海拔地区不同生境中河岸植物的研究十分缺乏。

具鳞水柏枝(*Myricaria squamosa*)是青藏高原地区的优势河谷灌木, 在青海湖流域主要分布在沙柳河、布哈河等子流域, 具有固岸护坡和保土固沙的作用, 但由于气候变化和人类活动的影响, 具鳞水柏枝已出现退化现象(王勇等, 2006; 李岳坦, 2010), 目前对具鳞水柏枝的研究集中在空间分布、退化机理和生态水文功能等方面(李岳坦, 2010; 马育军, 2011), 缺乏不同生境下其植物水分利用研究。本文拟在青海湖流域的第二大子流域沙柳河流域, 通过分析具鳞水柏枝茎(木质部)水与潜在水源的氢稳定同位素比率(δD), 揭示生长在与河岸不同距离处的具鳞水柏枝水分利用来源的差异, 为研究河岸生态系统中不同水分条件对具鳞水柏枝生长的影响奠定基础。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

沙柳河是青海湖流域的第二大河流, 研究区在青海省三角城种羊场内, 位于沙柳河河岸带, 南临青海湖, 属于高原大陆性气候, 年平均气温–0.3 ℃, 年降水量381.8 mm, 年蒸发量1 454.4 mm。具鳞水柏枝分布于海拔3 200–3 400 m的河谷地带, 土壤类型为砂土, 含砾石较多, 导热性强, 持水性差, 土壤热通量变化幅度大(李岳坦, 2010)。采样点位于河岸边(A)及距离岸边约100 m处(B), 分别代表受河水影响程度不同的两种水文环境(图1)。河岸边0–30 cm土壤为质地均匀的粗砂, 30 cm以下为砾石层, 距离河岸约100 m处0–50 cm为质地均匀的细砂与黏土混合层, 50 cm以下为砾石层。C处(距离A、B 150–200 m)河道已被人为封堵, 有自动气象站(DynaMet, Dynamax Inc., Houston, USA)长期观测降水量, 记录时间间隔为10 min。

1.2 实验方法和样品分析

1.2.1 取样方法

在2012年6月10日、7月22日、8月25日和9月17日, 在河岸边和距离河岸约100 m处分别选取生长状况良好、相近且相似的具鳞水柏枝植株3株, 每株选取栓化枝条3枝, 剪取靠近地面的4–5 cm部分, 并迅速剥去表皮。在采样植株附近挖取2个土壤剖面, 每隔10 cm采集土壤样品, 每层3个重复, 直到水面或至100 cm处, 样品分为两部分, 以提取土壤水分和用烘干法测定土壤含水量。在6月10日, 分别选择采集土壤样品的其中一个土壤剖面将其挖至2 m, 埋下直径4 cm的PVC管(底端用纱布包裹), 每次与采集植物样品同时, 用注射器抽取底部地下水样品3个。同时, 在河岸边采样植株附近采集河水面以下20–30 cm处河水样品3个。在两处采样点中间空旷区设置三脚架, 在离地面1.5 m处采集2012年5月1日至9月30日的每次降水样品, 每次3个重复。所有植物和土壤样品装入10 mL带螺纹口的玻璃瓶中, 用PARAFILM封口膜封口并置于–18 ℃冰柜中冷冻, 水样装于50 mL塑料方瓶中封口并在–2 ℃下冷藏, 直到分析氢稳定同位素组成。

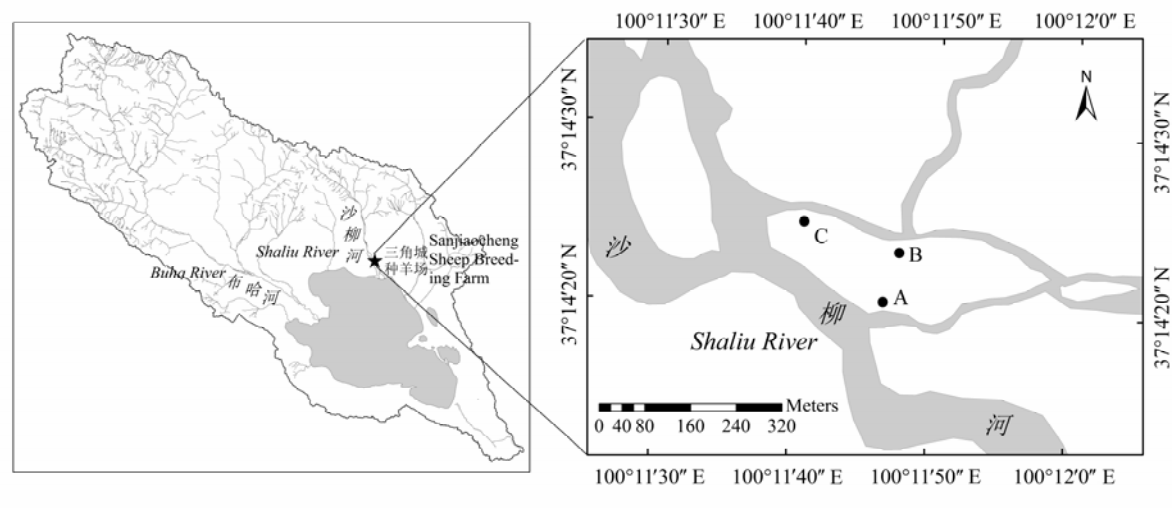

图1 试验点位置。A, 河岸边; B, 距离河岸约100 m; C, 距离A、B 150–200 m安装自动气象站。
Fig. 1 The experimental site locations. A, on river bank; B, about 100 m away from river bank; C, automatic meteorological station installed 150–200 m away from A and B.

1.2.2 水分提取和同位素测定

植物和土壤水分提取及不同水体的δD测定均在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室完成, 用低温真空蒸馏法(Yang *et al.*, 2010)(LI-2000植物水和土壤水抽提装置, 北京理加联合科技有限公司)提取水分, 用LGR (908-0008)液态水同位素分析仪(Lios Gatos Research, Mountain View, USA)测定各水体的δD, 用LWIA-Spectral Contamination Identifier v1.0软件对测定数据进行光谱污染修正, 测定结果以维也纳标准平均海水(VSMOW)校正, 测定精度为0.3‰。

1.2.3 根系密度调查

6月份, 在河岸边与距离河岸约100 m处, 分别选取与采样植株邻近并生长状况相似的具鳞水柏枝3株, 用直接挖掘法自地表向下调查1 m × 1 m范围内每隔10 cm的根系密度, 直到水面或至100 cm处。

1.2.4 数据分析

采用SPSS 13.0和Origin 8.0分析河岸边及距离河岸约100 m处具鳞水柏枝茎水及潜在水源δD的季节变化特征。根据土壤水δD值的垂直变化, 先将河岸边30 cm以上每隔10 cm分为3层, 30 cm以下每隔20 cm分层直到土壤剖面底部, 离河岸100 m处0–10 cm分为一层, 10 cm以下每隔20 cm分层直到土壤剖面底部, 再依据重新划分的土层用Isosource多源混合模型(Phillips & Gregg, 2003)计算各月不同土层土壤水、地下水及河水对两处具鳞水柏枝用水的相对贡献率, 计算增幅为1%, 不确定性水平为0.2%。

2 结果和分析

2.1 降水量变化

青海湖流域5–9月降水量占全年的85% (马育军, 2011), 2012年实验区较湿润。从图2可以看出, 实验区7月降水最多, 为135.13 mm; 8月次之, 为53.34 mm; 6月和9月降水均较少, 分别为35和32 mm。5月1日至6月10日, 降水量为48.77 mm; 6月10日至7月22日降水量为131.32 mm, 占采样期间降水总量的46.58%, 且单次降水量较大, 最大为14.99 mm, 7月6日至21日有6次较大降水, 总量达77.22 mm。7月22日至9月17日总降水量、次降水量及降水天数均有所减少, 其中7月22日和8月25日期间总降水量为74.17 mm, 而8月25日和9月17日期间仅为27.69 mm。

2.2 根系分布特征

具鳞水柏枝的根系分布特征因水文环境而不同。如图3所示, 河岸边10–30 cm土层中根系密度最大, 为208.48 g·m^{-2}, 占所调查土层范围内根系总量的72.59%, 50–70 cm土层中分布的根系仅占6.3%。距离河岸约100 m处40–60 cm土层内的根系密度最大, 为122.3 g·m^{-2}, 占所调查土层范围内根系总量的58.87%, 30–60 cm土层范围内的根系占74.53%, 而0–30 cm土层内的根系密度最小, 只占5.63%。厌

doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00112

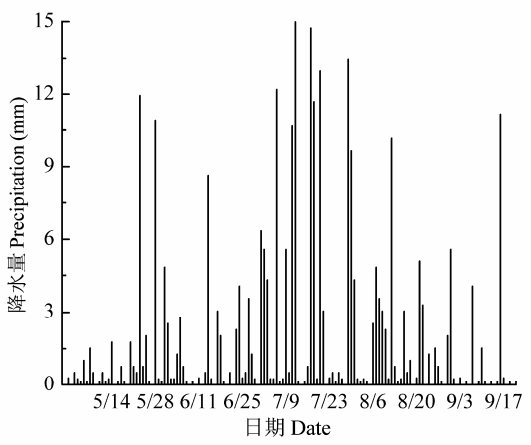

图2 实验区降水量分布图。
Fig. 2 Distribution of precipitation at the experimental site.

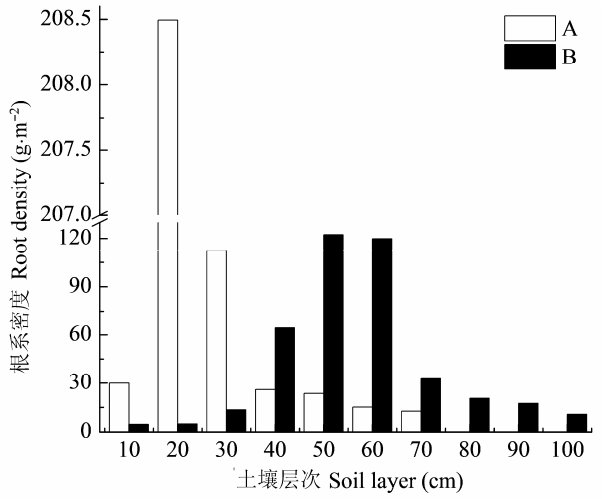

图3 具鳞水柏枝沿土壤剖面的根系密度分布。A, 河岸边; B, 距离河岸约100 m。
Fig. 3 Distribution of root density along soil profile in *Myricaria squamosa*. A, on river bank; B, about 100 m away from river bank.

氧环境致使植物根系死亡, 地下水埋深较浅时植物根系集中于土壤浅层(Rossatto *et al*., 2012), 越接近地下水位, 具鳞水柏枝的根系密度越小, 并且随着与河道距离的增加及地下水埋深的增大, 具鳞水柏枝的最大根系密度层有所加深。

2.3 土壤含水量的变化

具鳞水柏枝林地的土壤含水量受降水、土壤质地、地下水位波动等因素的共同影响而存在季节变化。如图4所示, 河岸边土壤水分随深度增加呈先减少后增加趋势, 主要是土壤持水性差且降水及地下水蒸发使表层和深层土壤含水量相对较高。6月10日0–30 cm土壤含水量低于8月25日和9月17日, 这是因为6月10日前降水量较少, 7月22日前虽有较多

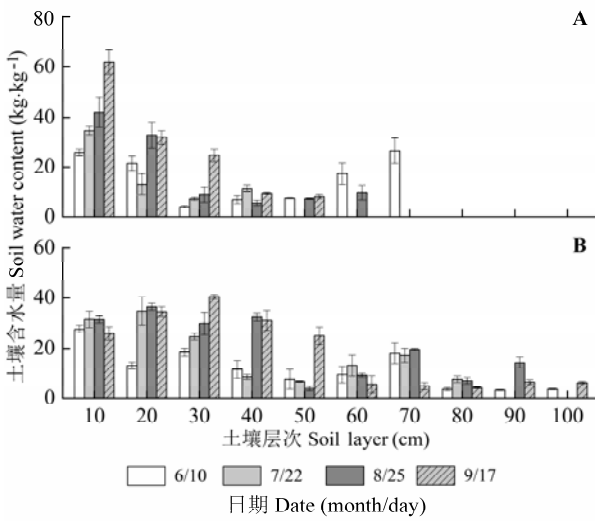

图4 土壤含水量的季节变化(平均值±标准偏差)。**A,** 河岸边。**B,** 距离河岸约100 m。
Fig. 4 Seasonal variation of soil water content (mean ± *SD*). **A,** On river bank. **B,** About 100 m away from river bank.

降水但该层土壤水分仍较少, 可能是较大的单次降水以优势流形式(Gerke *et al*., 2010)快速入渗所致。因取样前降水量较少, 20–50 cm土壤含水量在6月10日和8月25日低于同期其他层次。

距离河岸约100 m处上层土壤质地较细而使得0–30 cm土壤含水量相对较高。降水量较少使得6月10日0–30 cm土壤水分较7月22日、8月25日和9月17日少, 同时, 70–100 cm土壤水分较其他层次少, 这与地下水位较低有关。7月22日30–50 cm及8月25日40–60 cm土壤水分明显少于同期其他土层, 并与具鳞水柏枝的最大根系密度层(30–60 cm)一致, 可能是具鳞水柏枝吸收水分引起。降水量减少使9月17日50–100 cm土壤含水量明显偏低。

2.4 氘同位素变化

2.4.1 潜在水源*δ*D的季节变化

具鳞水柏枝茎内的氘同位素信息来源于其所利用的潜在水源。河岸边与距离河岸约100 m的土壤水*δ*D受降水影响较大(表1), 6月10日两处土壤水*δ*D较大, 7月较大的3次降水*δ*D分别为–75.49‰、–87.73‰及–73.6‰, 使7月22日0–10 cm土壤水*δ*D减小, 然而降水迅速入渗和蒸发作用使10 cm以下土壤水*δ*D不随降水*δD*减小。类似的, 8月25日前2次较大降水(*δ*D分别为–91.81‰和–107.80‰)使土壤水*δ*D迅速减小,但9月17日前2次降水(*δ*D分别为–27.47‰和–30.65‰)又使土壤水*δ*D增大。此外, 河

表1 土壤剖面水氢稳定同位素比率(δD)的季节变化(平均值±标准偏差)
Table 1 Seasonal variation of hydrogen stable isotope ratio (δD) in soil water along soil profile (mean ± *SD*)

土壤层 Soil layer (cm)	δD (VSMOW, ‰)							
	河岸边 On river bank				距离河岸约100 m About 100 m away from river bank			
	日期 Date (month/day)				日期 Date (month/day)			
	6/10	7/22	8/25	9/17	6/10	7/22	8/25	9/17
0–10	–32.81 ± 2.49^{a}	–66.37 ± 2.95^{a}	–58.14 ± 3.35^{a}	–26.51 ± 1.11^{a}	–36.75 ± 2.28^{a}	–76.34 ± 2.26^{a}	–80.08 ± 1.73^{a}	–60.42 ± 2.33^{a}
10–20	–47.06 ± 1.05^{b}	–29.16 ± 1.03^{b}	–62.49 ± 2.28^{b}	–32.25 ± 2.77^{b}	–48.92 ± 2.19^{b}	–27.48 ± 1.71^{b}	–80.85 ± 3.83^{a}	–62.30 ± 2.42^{a}
20–30	–41.99 ± 3.18^{c}	–31.88 ± 0.88^{b}	–55.60 ± 0.47^{a}	–47.77 ± 0.29^{c}	–49.20 ± 2.16^{b}	–37.81 ± 3.86^{c}	–76.99 ± 0.58^{a}	–62.07 ± 2.39^{a}
30–40	–42.37 ± 0.40^{c}	–35.38 ± 0.16^{c}	–55.05 ± 1.50^{a}	–45.33 ± 0.57^{c}	–50.68 ± 2.45^{b}	–46.71 ± 0.40^{d}	–74.49 ± 3.46^{a}	–64.65 ± 2.57^{a}
40–50	–42.02 ± 1.29^{c}	–	–53.79 ± 1.10^{a}	–45.75 ± 0.45^{c}	–44.26 ± 1.71^{c}	–46.08 ± 1.77^{d}	–61.61 ± 2.89^{b}	–55.47 ± 2.01^{b}
50–60	–42.23 ± 1.51^{c}	–	–52.84 ± 1.69^{c}	–	–47.93 ± 2.43^{bc}	–43.89 ± 0.94^{d}	–55.99 ± 2.72^{bc}	–49.83 ± 3.87^{c}
60–70	–44.04 ± 2.40^{c}	–	–	–	–48.89 ± 1.70^{b}	–45.63 ± 2.56^{d}	–50.86 ± 2.28^{bc}	–46.40 ± 1.85^{cd}
70–80	–	–	–	–	–43.43 ± 1.65^{c}	–42.83 ± 2.49^{cd}	–47.52 ± 2.68^{c}	–44.44 ± 0.73^{cd}
80–90	–	–	–	–	–43.28 ± 1.82^{c}	–	–51.63 ± 2.18^{bc}	–44.61 ± 2.70^{cd}
90–100	–	–	–	–	–44.39 ± 1.88^{c}	–	–	–42.98 ± 2.48^{d}

同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。VSMOW, 维也纳标准平均海水。
Different letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$). VSMOW, Vienna standard mean ocean water.

岸边土壤水δD易受地下水和河水蒸发影响而比同期距离河岸约100 m处的土壤水δD值大。单因素方差分析结果表明, 河岸边和距离河岸约100 m处0–20 cm土壤水δD随时间变幅较大; 在同一次采样中, 河岸边20 cm以下土壤水δD相对稳定, 而距离河岸约100 m处0–40 cm土壤水δD相对稳定, 但7月22日该层差异显著, 这是前期土壤水与近期降水混合所致。

如图5所示, 河岸边、距离河岸约100 m处的地下水及河水δD在6月10日和7月22日较大, 并且差异不显著, 表明补给来源相同, 虽然7月22日前降水量较多且δD较小, 但对地下水和河水δD影响较小; 8月25日地下水与河水δD最小, 主要是受近期降水影响, 三者间的显著差异表明补给来源不同; 9月17日地下水与河水δD增大, 但距离河岸约100 m处地下水的δD低于河水和河岸边地下水δD值。

2.4.2 具鳞水柏枝茎水δD的季节变化

从图6可以看出, 河岸边和距离河岸约100 m处具鳞水柏枝植物茎水δD从6月10日到8月25日减小, 而9月17日增大, 如河岸边从–39.29‰减小为–59.85‰又增大为–52.21‰, 距离河岸约100 m处从–39.24‰减小为–58.04‰又增大为–54.81‰。两处

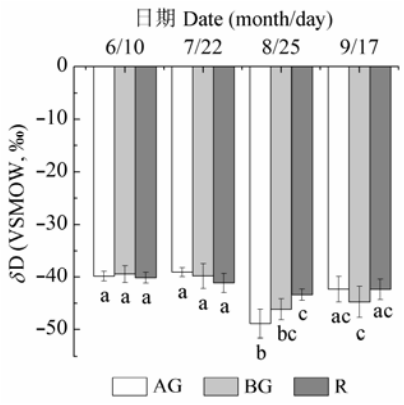

图5 地下水、河水氢稳定同位素比率(δD)的季节变化(平均值±标准偏差)。AG, 河岸边地下水; BG, 距离河岸约100 m处地下水; R, 河水。VSMOW, 维也纳标准平均海水。
Fig. 5 Seasonal variation of hydrogen stable isotope ratio (δD) in groundwater and river water (mean ± *SD*). AG, groundwater on river bank; BG, groundwater about 100 m away from river bank; R, river water. VSMOW, Vienna standard mean ocean water.

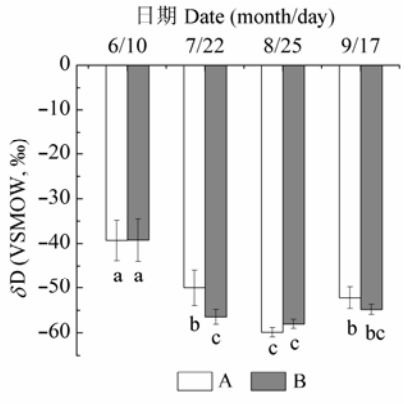

图6 具鳞水柏枝植物茎(木质部)水氢稳定同位素比率(δD)的季节变化(平均值±标准偏差)。A, 河岸边; B, 距离河岸约100 m。VSMOW, 维也纳标准平均海水。
Fig. 6 Seasonal variation of hydrogen stable isotope ratio (δD) in stem (xylem) water (mean ± *SD*) A, on river bank; B, about 100 m away from river bank. VSMOW, Vienna standard mean ocean water.

doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00112

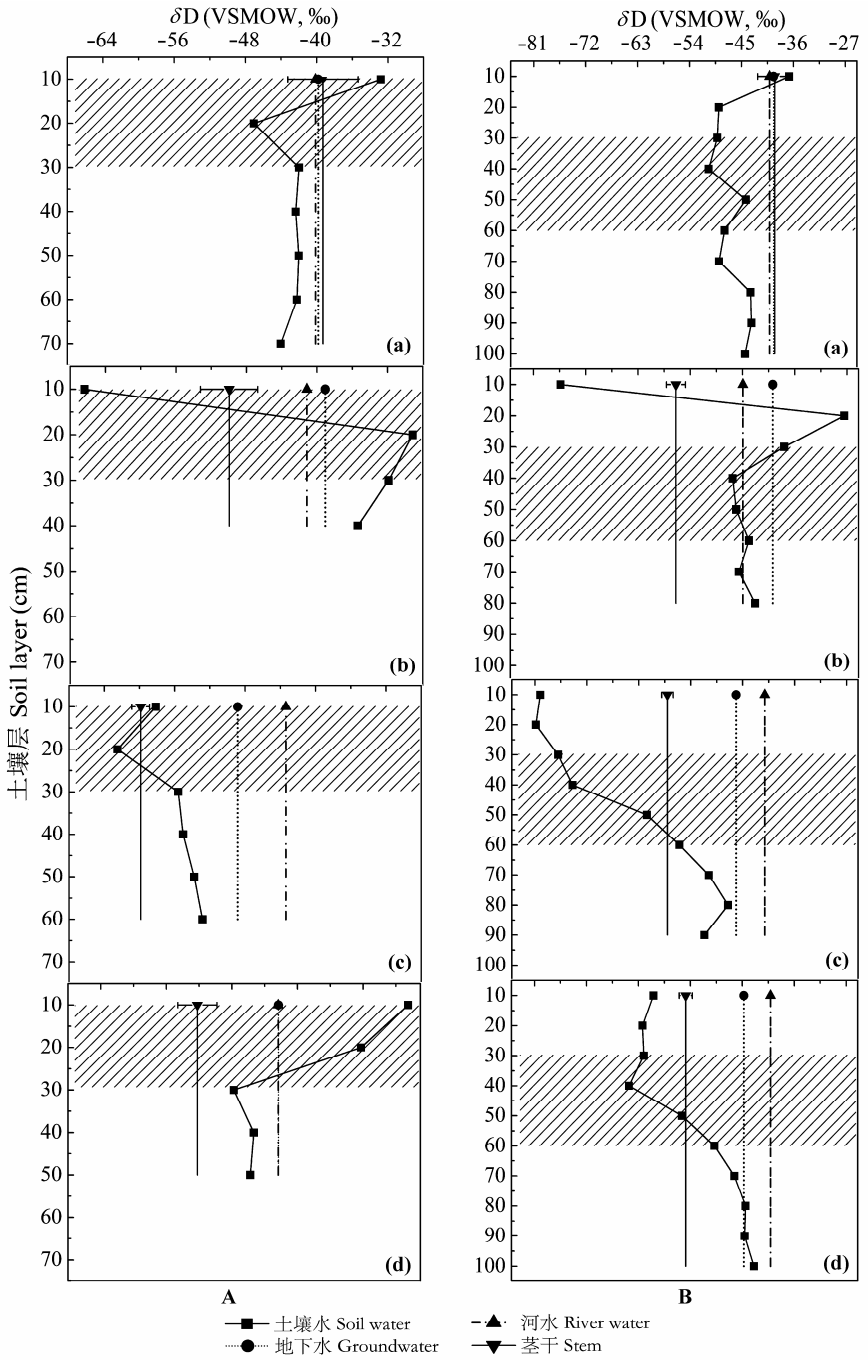

图7 具鳞水柏枝水分来源的季节变化。**A,** 河岸边。**B,** 距离河岸约100 m。**(a),** 6月。**(b),** 7月。**(c),** 8月。**(d),** 9月。阴影区为最大根系密度层。VSMOW, 维也纳标准平均海水。

Fig. 7 Seasonal variations of water sources in *Myricaria squamosa*. **A,** On river bank. **B,** About 100 m away from river bank. **(a),** June. **(b),** July. **(c),** August. **(d),** September. The shaded area represents the layer with maximum root density. VSMOW, Vienna standard mean ocean water.

植物茎水δD在6月10日和8月25日差异不显著, 表明有相似的水源; 河岸边具鳞水柏枝茎水δD在7月22日和9月17日差异不显著, 而与6月10日和8月25日都显著差异, 证明此处具鳞水柏枝可能存在3种水分来源; 距离河岸约100 m处具鳞水柏枝茎水δD除6月10日外差异不显著, 因而, 此处具鳞水柏枝存在2种可能水源。

2.5 具鳞水柏枝的水分来源

除海岸带湿地植物外, 水分在由植物根系向茎干输送的过程中氢稳定同位素不发生分馏(Lin & Sternberg, 1993), 通过对比具鳞水柏枝茎水与地下水、河水和土壤水δD (图7), 计算各潜在水源对其

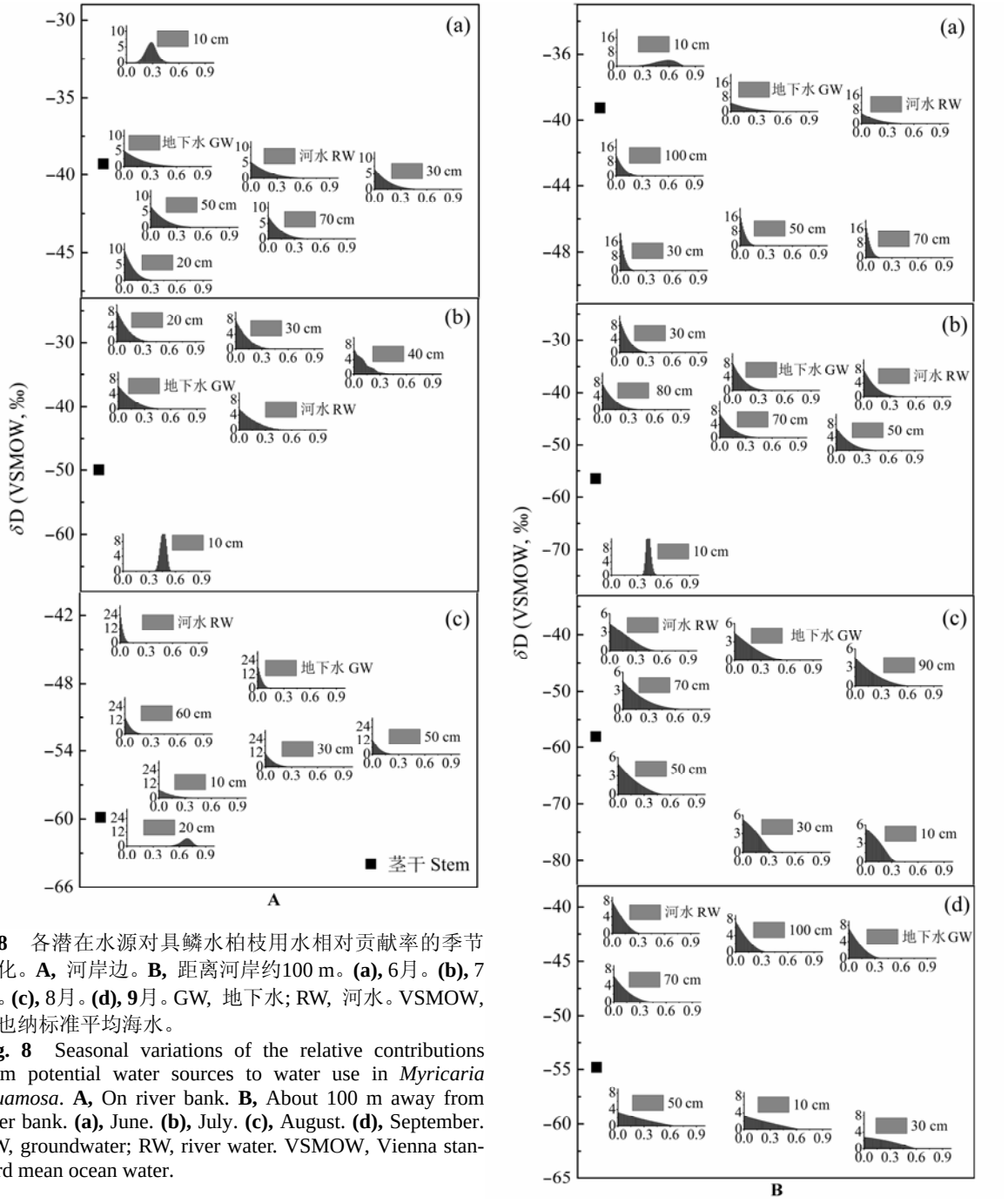

图8 各潜在水源对具鳞水柏枝用水相对贡献率的季节变化。**A,** 河岸边。**B,** 距离河岸约100 m。**(a),** 6月。**(b),** 7月。**(c),** 8月。**(d),** 9月。GW, 地下水; RW, 河水。VSMOW, 维也纳标准平均海水。

Fig. 8 Seasonal variations of the relative contributions from potential water sources to water use in *Myricaria squamosa*. **A,** On river bank. **B,** About 100 m away from river bank. **(a),** June. **(b),** July. **(c),** August. **(d),** September. GW, groundwater; RW, river water. VSMOW, Vienna standard mean ocean water.

用水的相对贡献率(图8), 可以确定两种水文环境中具鳞水柏枝的水分来源。

河岸边具鳞水柏枝在6月10日以地下水和河水为主要水源, 分别最多为其所利用水分的89%和86%, 7月22日前的较多降水也并未减少其对地下水和河水(55%、65%)的依赖, 而这两次取样时的土壤含水量均较低。8月25日随着土壤水分增加, 其主要水源为最大根系密度层内的土壤水, 对0–10和10–20 cm土壤水最多利用59%和85%。9月17日具鳞水柏枝茎水δD小于潜在水源, 但与7月22日相似, 二者水源可能相似。

距离河岸约100 m处的具鳞水柏枝在6月10日以地下水和河水为主要水源(91%、70%), 但对0–10 cm土壤水的利用量(79%)较河岸边多, 是离河水较远且地下水位较低所致。7月22日此处具鳞水柏枝对地下水和河水的利用量减少, 而以不同土层的混合土壤水为主要水源, 对30–50、50–70和70–80 cm土壤水最多利用63%、57%和58%。8月25日其水源相对于7月22日转向更深土层, 对50–70和70–90 cm土壤水最多利用82%和72%。9月17日具鳞水柏枝的

doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00112

水源又转向50 cm以上土壤水，对0–10、10–30和30–50 cm土壤水分别最多利用59%、63%和70%。

3 结论和讨论

3.1 土壤水δD变化的影响因素

土壤水δD随土层及取样时间而变，而随土层的垂直变化体现降水入渗及地下水蒸发对土壤水分的影响(田立德等, 2002; Xu *et al*., 2012)，是分析植物用水来源的基础，土壤水δD主要受降水、蒸发、地下水、土壤质地及土壤含水量等因素的影响。

在具鳞水柏枝林地，表层土壤水δD与降水δD变化趋势一致，并随季节变幅较大，深层土壤水δD受地下水影响较大而变幅较小。河岸边0–10 cm土壤水δD在–26.51‰ – –66.37‰之间变动，距离河岸约100 m处在–36.75‰ – –80.08‰间变化，可见后者受降水影响更大。与此相似，太行山区表层10 cm土壤水δ^{18}O与降水δ^{18}O有相同的变化趋势(侯士彬等, 2008)，在青藏高原中部和亚高山暗针叶林地也发现，浅层土壤水δ^{18}O、δD受降水影响变化幅度较大，而深层受地下水影响变化幅度较小(田立德等, 2002; 徐庆等, 2007; Xu *et al*., 2011)。地下水位对土壤剖面水δD也有影响，距离河岸约100 m处土壤水δD小于同期河岸边且变化幅度较大，如7月22日前者土壤水δD变化范围是–27.48‰ – –76.34‰，而后者为–29.16‰ – –66.34‰，这是河岸边地下水位较浅所致。在巴西热带草原区的研究也证明坡上地下水位较低时土壤水δ^{18}O和δD变化幅度较大，而坡下随着地下水位升高，土壤水δ^{18}O和δD迅速接近地下水(Rossatto *et al*., 2012)。

土壤含水量也影响土壤水δD，如旱季土壤水分随深度增加而土壤水δD减小(Jackson *et al*., 1999)，干旱样地土壤水δ^{18}O较湿润样地大(Gazis & Feng, 2004)，旱季中表层土壤含水量与土壤水δD值呈显著负相关关系(孙守家等, 2010)，而在具鳞水柏枝林地，土壤含水量与土壤水δD无显著相关关系。此外，土壤质地对土壤水δD也有影响，与土壤质地转变土层相同，河岸边在土层30 cm、距离河岸约100 m处在土层50 cm处土壤水δD明显变大。相关研究也表明砂土和黄土中土壤水同位素组成在降水入渗过程中有差异(孙晓旭等, 2012)。可见，在具鳞水柏枝林地，河岸边土壤水δD易受地下水影响，而距离河岸约100 m处受降水影响更大，土壤质地对两处土壤水δD均有影响，这将影响两处具鳞水柏枝的水分利用。

3.2 具鳞水柏枝水分来源变化的影响因素

植物茎内的氢氧同位素组成取决于其吸收的水分，河岸植物有土壤水、河水和地下水3种可能水源(王平元等, 2010)，而在同一河岸带，因水文环境差异，相同植物的水分来源不尽相同。

地球上绝大多数植物都会经历降水相对少的季节(王平元等, 2010)，植物对其有一定的适应机制，二形态根系在季节性干旱地区较为普遍，雨季侧根吸收浅层土壤水而旱季主根吸收深层土壤水或地下水，水源转变可使植物度过干旱期(Dawson & Pate, 1996; Rossatto *et al*., 2012)。具鳞水柏枝的根系有二形态特征，其水源也有类似转变，6月10日前降水量较少，土壤含水量较低，河岸边和距离河岸约100 m处的具鳞水柏枝均以地下水和河水为主要水源，随降水和土壤水分增多，8月25日其主要水源转为土壤水，这是其对干旱条件的适应。根系常在植物吸水土层迅速生长，如糙皮桦(*Betula utilis*)和冷箭竹(*Bashania fangiana*)的吸水土层与细根分布层(0–40 cm)一致(Xu *et al*., 2011)，*Quercus robur*和银白杨(*Populus alba*)的吸水土层与根系集中分布层(20–60 cm)一致(Sánchez-Pérez *et al*., 2008)。与此相同，河岸边具鳞水柏枝在8月25日主要利用最大根系密度层(10–20 cm)的土壤水，距离河岸约100 m处的具鳞水柏枝在7月22日、8月25日和9月17日对根系集中分布层(30–60 cm)的土壤水利用最多，可见，具鳞水柏枝在雨季主要利用土壤水，且距离河岸约100 m处的植株较河岸边的植株更多地利用土壤水。

植物利用地下水可以获得稳定的水源，如生长在澳大利亚干旱且高盐度河岸带的*Eucalyptus coolabah*、荒漠生态系统中的白刺(*Nitraria tangutorum*)及亚高山的岷江冷杉(*Abies faxoniana*)始终利用地下水(Costelloe *et al*., 2008; Duan *et al*., 2008; Xu *et al*., 2011)，当地下水位降低时，柽柳对其的利用量会减少(Nippert *et al*., 2010)。然而，地下水位较浅时O_2不足会影响植物生长(Rossatto *et al*., 2012)，因此，即使地下水位较浅，*Q. robur*和银白杨利用非饱和带水而非地下水(Sánchez-Pérez *et al*., 2008)，木本植物对浅层土壤水的利用量与地下水位呈正相关关系(Rossatto *et al*., 2012)。本文发现具

鳞水柏在地下水位较高时对其利用量较少, 河岸边具鳞水柏枝在6月10日(68 cm)和7月22日(42 cm)最多利用89%及55%的地下水, 距离河岸约100 m处的植株在6月10日(120 cm)和7月22日(81 cm)最多利用91%及51%的地下水, 但前者对地下水的利用量多于后者。与地下水不同, 河水并非半干旱和干旱区河岸植物*E. coolabah*、银白杨及柳树(*Salix* spp.)的主要水源(Li *et al*., 2007; Costelloe *et al*., 2008), 当离河岸较远时*Eucalyptus camaldulensis*不利用河水(Thorburn & Walker, 1994)。然而, 河水是具鳞水柏枝在旱季的重要水源, 而且河岸边的具鳞水柏枝对河水的利用量较距离河岸约100 m的多。

综上所述, 生长在河岸边和距离河岸约100 m的具鳞水柏枝有不同的植物水分利用方式。降水量较少时两处具鳞水柏枝均以地下水和河水为主要水源, 而随降水量增多其主要利用最大根系密度层内的土壤水(河岸边0–30 cm、距离河岸约100 m处30–60 cm), 但河岸边的具鳞水柏枝对地下水和河水的利用时间较长, 距离河岸约100 m处的对土壤水的利用量较多。实验区土壤蒸发的水分主要由河水补给, 而气候变化及人类活动带来的河流系统动态变化将影响具鳞水柏枝水分利用, 最终导致具鳞水柏枝群落结构变化, 这需要结合不同水文环境中具鳞水柏枝与共生草本植物的水分竞争关系进一步研究。

基金项目 国家自然科学基金重点项目(41130640)、长江学者和创新团队计划“土壤水文与土壤侵蚀”(批准号: IRT1108)和中央高校基本科研业务费专项资助。

参考文献

Brooks JR, Barnard HR, Coulombe R, McDonnell JJ (2010). Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature GeoScience*, 3, 100–104.

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.

Costelloe JF, Payne E, Woodrow IE, Irvine EC, Western AW, Leaney FW (2008). Water sources accessed by arid zone riparian trees in highly saline environments, Australia. *Oecologia*, 156, 43–52.

Dawson TE, Ehleringer JR (1991). Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 350, 335–337.

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, 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.

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

Gerke HH, Germann P, Nieber J (2010). Preferential and unstable flow: from the pore to the catchment scale. *Vadose Zone Journal*, 9, 207–212.

Helfield JM, Engström J, Michel JT, Nilsson C, Jansson R (2012). Effects of river restoration on riparian biodiversity in secondary channels of the Pite River, Sweden. *Environmental Management*, 49, 130–141.

Hou SB, Song XF, Yu JJ, Liu X, Zhang GY (2008). Stable isotopes characters in the process of precipitation and infiltration in Taihang Mountainous region. *Resources Science*, 30, 86–92. (in Chinese with English abstract) [侯士彬, 宋献方, 于静洁, 刘鑫, 张广英 (2008). 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析. 资源科学, 30, 86–92.]

Jackson PC, Meinzer FC, Bustamante M, Goldstein G, Franco A, Rundel PW, Caldas L, Igler E, Causin F (1999). Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem. *Tree Physiology*, 19, 717–724.

Jolly ID, Walker GR (1996). Is the field water use of *Eucalyptus Largiflorens* F. Muell. affected by short-term flooding. *Australian Journal of Ecology*, 21, 173–183.

Li SG, Romero-Saltos H, Tsujimura M, Sugimoto A, Sasaki L, Davaa G, Oyunbaatar D (2007). Plant water sources in the cold semiarid ecosystem of the upper Kherlen River catchment in Mongolia: a stable isotope approach. *Journal of Hydrology*, 333, 109–117.

Li YT (2010). *Community Structure and Degradation Mechanism of Riparian Vegetation in Lake Qinghai Basin*. PhD dissertation, Beijing Normal University, Beijing. 9–50. (in Chinese with English abstract). [李岳坦 (2010). 青海湖流域河岸植被群落结构特征及退化机理研究. 博士学位论文, 北京师范大学, 北京. 9–50.]

Lin GH, Sternberg LDL (1993). Hydrogen isotope fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants. In: Ehleringer J, Hall AE, Farquhar GD eds. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*. Kluwer, New York.

Ma YJ (2011). *Ecohydrological Processes and Ecological Water Requirements in Qinghai Lake Watershed*. PhD dissertation, Beijing Normal University, Beijing. 1–129. (in Chinese). [马育军 (2011). 青海湖流域生态水文过程与生态需水研究. 博士学位论文, 北京师范大学, 北京. 1–129.]

doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00112

Mitsch WJ, Gosselink JG (2000). The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics*, 35, 25–33.

Nippert JB, Butler JJ Jr, Kluitenberg GJ, Whittemore DO, Arnold D, Spal SE, Ward JK (2010). Patterns of *Tamarix* water use during a record drought. *Oecologia*, 162, 283–292.

Phillips DL, Gregg JW (2003). Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 136, 261–269.

Rao LY, Cui JG (2008). Research advances on the eco-hydrological functions of riparian buffer. *Science of Soil and Water Conservation*, 6(4), 121–128. (in Chinese with English abstract) [饶良懿, 崔建国 (2008). 河岸植被缓冲带生态水文功能研究进展. 中国水土保持科学, 6(4), 121–128.]

Rossatto DR, Silva LDR, Villalobos-Vega R, Sternberg LDL, Franco AC (2012). Depth of water uptake in woody plants relates to groundwater level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna. *Environmental and Experimental Botany*, 77, 259–266.

Sánchez-pérez JM, Lucot E, Bariac T, Trémolières M (2008). Water uptake by trees in a riparian hardwood forest (Rhine floodplain, France). *Hydrological Processes*, 22, 366–375.

Snyder KA, Williams DG (2000). Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona. *Agricultural and Forest Meteorology*, 105, 227–240.

Sun SJ, Meng P, Zhang JS, Huang H, Wan XC (2010). Deuterium isotope variation and water use in an agroforestry system in the rocky mountainous area of North China. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 3717–3726. (in Chinese with English abstract) [孙守家, 孟平, 张劲松, 黄辉, 万贤崇 (2010). 华北石质山区核桃-绿豆复合系统氘同位素变化及其水分利用. 生态学报, 30, 3717–3726.]

Sun XX, Chen JS, Shi GX, Tan HB, Liu XY, Su ZG (2012). Hydrogen and oxygen isotopic variations of different water bodies in evaporation and rainfall infiltration processes. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28, 100–105. (in Chinese with English abstract) [孙晓旭, 陈建生, 史公勋, 谭红兵, 刘晓艳, 苏治国 (2012). 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律. 农业工程学报, 28, 100–105.]

Thorburn PJ, Walker GR (1994). Variations in stream water uptake by *Eucalyptus camaldulensis* with differing access to stream water. *Oecologia*, 100, 293–301.

Tian LD, Yao TD, Tsujimura M, Sun WZ (2002). Stable isotope in soil water in the middle of Tibetan Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 39, 289–295. (in Chinese with English abstract) [田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 孙维贞 (2002). 青藏高原中部土壤水中稳定同位素变化. 土壤学报, 39, 289–295.]

Wang PY, Liu WJ, Li PJ, Li JT (2010). Advances in studies on plant water use strategy. *Guihaia*, 30, 82–88. (in Chinese with English abstract) [王平元, 刘文杰, 李鹏菊, 李金涛 (2010). 植物水分利用策略研究进展. 广西植物, 30, 82–88.]

Wang Y, Liu YF, Liu SB, Huang HW (2006). Geographic distribution and current status and conservation strategy of the Genus *Myricaria* in China. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 24, 455–463. (in Chinese with English abstract) [王勇, 刘义飞, 刘松柏, 黄宏文 (2006). 中国水柏枝属植物的地理分布、濒危状况及其保育策略. 武汉植物学研究, 24, 455–463.]

Xu Q, Li HB, Chen JQ, Cheng XL, Liu SR, An SQ (2011). Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: the deuterium isotope approach. *Ecohydrology*, 4, 236–244.

Xu Q, Liu SR, An SQ, Jiang YX, Lin GH (2007). Characteristics of hydrogen stable isotope in soil water of sub-alpine dark coniferous forest in Wolong, Sichuan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(1), 8–14. (in Chinese with English abstract) [徐庆, 刘世荣, 安树青, 蒋有绪, 林光辉 (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.]

Xu Q, Liu SR, Wan XC, Jiang CQ, Song XF, Wang JX (2012). Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes*, 26, 3800–3809.

Yang H, Auerswald K, Bai YF, Han XG (2011). Complementarity in water sources among dominant species in typical steppe ecosystems of Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*, 340, 303–313.

Yang Q, Xiao HL, Zhao LJ, Zhou MX, Li CZ, Cao SK (2010). Stable isotope techniques in plant water sources: a review. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2, 112–122.

Zhao LJ, Xiao HL, Cheng GD, Song YX, Zhao L, Li CZ, Yang Q (2008). A preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin. *Acta Geoscientia Sinica*, 29, 709–718. (in Chinese with English abstract) [赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 宋耀选, 赵亮, 李彩芝, 杨秋(2008). 黑河下游河岸林植物水分来源初步研究. 地球学报, 29, 709–718.]

Zhu YJ, Lu Q, Wu B, Li YH, Yao B, Zhang JX (2013). Effects of increased precipitation on the water use of *Nitraira tangutorum* at southeast edge of Baddain Jaran Desert in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 41–48. (in Chinese with English abstract) [朱雅娟, 卢琦, 吴波, 李永华, 姚斌, 张金鑫 (2013). 增雨对巴丹吉林沙漠东南缘白刺水分利用的影响. 应用生态学报, 24, 41–48.]

责任编委: 林光辉 责任编辑: 李 敏