

宁夏平原北部地下水埋深浅地区不同灌木的水分来源

朱林^{1,2*} 许兴¹ 毛桂莲³

¹宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; ²中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ³宁夏大学生命科学学院, 银川 750021

摘要 宁夏平原北部引黄灌区地下水埋深浅是该地区土壤盐碱化的主要原因, 种植耐盐植物可以吸收利用地下水, 在降低地下水位的同時可以减少对地面灌溉的依赖。为了分析银川平原北部4种灌木对不同水源的利用特征, 于2010年生长季测定了灌溉前后20年生多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、3年生多枝柽柳、3年生宁夏枸杞(*Lycium barbarum*)和3年生四翅滨藜(*Atriplex canescens*)木质部水及不同潜在水源稳定氧、氢同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 和 δD), 应用IsoSource同位素线性混合模型估算了不同灌木对不同水源的利用率。同时测定了0–200 cm土壤剖面的全盐含量、含水量和pH值以及灌溉前后光合气体交换参数。结果表明: 不同深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值存在较大差异, 并呈规律性变化。土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值随深度加深呈逐渐降低的趋势。灌溉后80 cm以上土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值低于灌溉前。无论灌溉前还是灌溉后, 20年生多枝柽柳与3年生灌木相比具有更低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值。灌溉前, 3年生多枝柽柳、宁夏枸杞和四翅滨藜主要利用表层土壤水(70.1%、52.3%和48.9%); 20年生多枝柽柳对地下水的利用率最高(21.5%)。灌溉后, 3年生多枝柽柳和宁夏枸杞对80–140 cm土壤水利用率较高(59.5%和58.8%)。20年生多枝柽柳对地下水的利用率最高(18.3%)。灌溉前, 20年生多枝柽柳净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著高于其他3种灌木, 灌溉后3年生四翅滨藜净光合速率最高。灌溉对3年生多枝柽柳和宁夏枸杞的净光合速率和气孔导度有显著影响。无论灌溉前还是灌溉后, 3年生四翅滨藜瞬间水分利用效率均高于其他3种灌木。研究表明, 不同灌木在不同水分条件下水分利用策略不同, 这主要与植物种类及树龄有关。灌溉前幼龄多枝柽柳凭借其对于干旱较强的忍耐能力利用浅层不饱和土壤水, 灌溉后其又转而利用中层土壤水, 表现出潜水湿生植物的特征, 主要吸收利用深层土壤水分, 对灌溉反应不明显。

关键词 地下水利用, 宁夏平原, 盐碱地, 灌木, 稳定氢氧同位素

Water sources of shrubs grown in the northern Ningxia Plain of China characterized by shallow groundwater table

ZHU Lin^{1,2*}, XU Xing¹, and MAO Gui-Lian³

¹Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; and ³Life Science College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract

Aims Shallow groundwater table is the main cause of salinization in the northern Ningxia Plain of China. The uptake of groundwater by halophytes can lower the groundwater table and reduce the demand for irrigation. Our objective was to investigate the potential water sources (different soil profile and groundwater) of four shrubs, i.e., twenty-year-old *Tamarix ramosissima* and three-year-old *T. ramosissima*, *Lycium barbarum* and *Atriplex canescens*.

Method Stable ^{18}O and D isotope compositions ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of different potential water sources and xylem water were analyzed before and after irrigation. The IsoSource mode was used to calculate the probable contribution of different water sources to the total plant water uptake. The photosynthetic gas exchange parameters, contents of salt and water and pH in 0–200 cm soil profile were also determined.

Important findings Soil water $\delta^{18}\text{O}$ and δD in different depths differed consistently. The soil water $\delta^{18}\text{O}$ and δD values decreased with depth. More negative soil water $\delta^{18}\text{O}$ and δD values were recorded after irrigation. There were significant effects of evaporation and irrigation on soil water $\delta^{18}\text{O}$ and δD values. $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of twenty-year-old *T. ramosissima* were lower than that of the three-year-old shrubs. Before irrigation, the

three-year-old *T. ramosissima*, *L. barbarum* and *A. canescens* mainly tapped water in the upper soil layer (70.1%, 52.3% and 48.9%); highest groundwater uptake rate (21.5%) was observed for twenty-year-old *T. ramosissima*. After irrigation, higher water uptake rates from 80–140 cm soil profile were recorded for three-year-old *T. ramosissima* (59.5%) and *L. barbarum* (58.8%). Highest groundwater uptake rate was found for twenty-year-old *T. ramosissima* (18.3%). Before irrigation, the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of twenty-year-old *T. ramosissima* were higher than those of other shrubs. Highest net photosynthetic rate were observed for three-year-old *A. canescens* after irrigation. Irrigation had significant effects on net photosynthetic rate and stomatal conductance of three-year-old *T. ramosissima* and *L. barbarum*. The intrinsic water use efficiency of three-year-old *A. canescens* was higher than other shrubs. These results suggested that different shrubs have different water use strategies, which is presumably related to species and age of shrubs. Young *T. ramosissima* mainly extracted soil water from upper un-saturated profile based on its strong tolerance to drought, and it switched its water use to middle soil profile after irrigation. Mature *T. ramosissima* turned out to be phreatophytic with growth being heavily dependent on groundwater and deep soil water and unresponsive to irrigation.

Key words groundwater utilization, Ningxia Plain, saline-alkali land, shrub, stable hydrogen and oxygen isotope

传统的盐碱地改良措施主要以工程措施为主, 要求有充足的优质水源和良好的排水系统, 占去耕地甚多, 投资巨大, 维护费用高, 易造成土壤次生盐渍化及土壤中一些植物必需的矿质元素如P、Fe、Mg与Zn的流失, 一旦停止灌水洗盐, 土壤还会逐渐返盐(赵可夫等, 2002)。而在盐碱地上种植耐盐植物, 可降低土壤盐分, 增加地表覆盖, 减少水分蒸发, 抑制盐分上升, 防止返盐, 还可以通过树木的蒸腾作用降低地下水位(张永宏, 2005; 李茜等, 2007)。

多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、四翅滨藜(*Atriplex canescens*)和宁夏枸杞(*Lycium barbarum*)具有较强的耐盐碱能力, 适宜在盐碱、干旱和沙荒地种植, 可作为生物改良树种用于盐碱地的改良(Matoh *et al.*, 1986; Khan *et al.*, 2000; 任葳等, 2004; 程广有等, 2007)。前两种灌木具有将盐分从细胞或组织内分泌出去的能力(McKell, 1994; 公维昌等, 2009), 在盐渍土上栽植可从土壤中吸收大量的盐分并积聚在植物体中, 从而降低了根系附近土壤中的盐含量(张立宾等, 2008)。多枝柽柳作为兼性潜水湿生植物(facultative phreatophyte), 可以利用包括地下水在内的多种水源(Busch *et al.*, 1992)。

利用传统的方法研究植物根系在水循环过程中的功能和确定植物的水分来源是非常困难的, 这些方法通常是对植物根系采取挖掘等手段, 不仅是破坏性的, 且耗时而不切实际(Meinzer *et al.*, 2001)。稳定同位素测定技术的发展使得科学家了解了不同土壤深度水分的同位素特征, 学者们通过研究发现, 由于每次降雨的同位素组成不同, 或是由

于蒸发作用的影响, 近地表的土壤水往往富含重的同位素, 而且土壤水的同位素组成会随着深度的变化而变化(Allison & Hughes, 1983)。这样, 通过分析不同深度土壤水以及植物木质部水中氢同位素(D和H)和氧同位素(^{18}O 和 ^{16}O)组成, 可以推断出植物利用不同层次土壤水的差异, 而不必对植物根系进行破坏性的挖掘(Ehrlinger & Dawson, 1992)。

目前, 利用氢氧稳定同位素组成方法研究植物水分来源的文献报道多集中在荒漠地区(Ehrlinger *et al.*, 1991; Dawson, 1993; Caldwell *et al.*, 1998; Schwinning *et al.*, 2005; Cheng *et al.*, 2006; 周雅聘等, 2011)、水土流失严重的地区(聂云鹏等, 2011)、河岸(Chimner & Cooper, 2004)以及热带雨林(李鹏菊等, 2008), 关于地下水浅埋深地区耐盐灌木对不同水源、尤其是地下水利用率的报道却很少见, 而在这些地区研究不同树种利用地下水的情况, 可以评价其降低地下水位的作用, 对于盐碱地改良树种的选择具有重要的指导意义。

本文借鉴国外相关研究方法, 应用稳定 ^{18}O 和D同位素信息来揭示位于半干旱荒漠地区的宁夏西大滩不同种类及不同生长年限盐生灌木对不同深度土壤水源的利用模式, 为指导地下水较浅地区深根吸收地下水植物的筛选提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

实验点设在宁夏平罗县西大滩(106°30'9" E, 38°52'33" N), 海拔约1 100 m。位于银川平原北部,

属黄河冲积平原,地势低洼,土质黏重,排水困难,土壤盐碱化严重(王恒俊等, 1989)。地下水埋深2.5 m左右,矿化度1–3 g·L⁻¹。气候干旱少雨,年降水量172.5 mm, 7–9月降水量占全年降水量的66.6%,年水面蒸发量达1 755 mm,为降水量的9.4倍,全年平均相对湿度为56%,属中温带半干旱荒漠气候。年日照2 800–3 200 h,年最大风力9级,最大风速18 m·s⁻¹(王恒俊等, 1989; 刘茂松等, 2001)。

试验地4–7月降雨量见图1, 6月26日用机井进行了一次灌溉,灌水定额为120 mm。

1.2 试验方法

1.2.1 取样方法

2010年5月28日和7月4日在西大滩七队选3年生人工种植的多枝桤柳、宁夏枸杞、四翅滨藜灌木林和野生多枝桤柳林地作为取样点,分别进行木质部水、地下水、雨水和土壤水取样。植物样品采集时选4株具有代表性的树木,由于植物幼嫩组织,如叶片及嫩枝参与蒸腾过程而使其富集更多的D同位素,导致其组织水 δD 值变大,而成熟的枝条因其外边有一层木栓化的树皮而降低了同位素蒸发富集作用,同时,由于韧皮部中有来自叶片的富含重同位素的水分(Ellsworth & Williams, 2007),会对实验结果有所影响,因此,我们在取样时选取朝向相似的木质化枝条,采集之后用小刀削去树皮,迅速装入特制玻璃瓶,用密封带封口。在取样植物附近用土钻取0–200 cm土壤样品,除表层取0–5 cm外,其他土层均每隔20 cm取土样,迅速装入特制的玻璃瓶中密封。每个植物及土壤样品重复两次,地下水取自附近的观测井。雨水样品于植物和土壤样采集前两天采集。土壤和植物样品进行冷冻,水样冷藏。

1.2.2 样品分析

在中国科学院植物研究所采用FLASHEA 1112HT型元素分析仪(Thermo Scientific, Bremen, Germany)和DELTA V型质谱仪(Thermo Scientific, Bremen, Germany)对不同水体 $\delta^{18}O$ 和 δD 进行测定。 $\delta^{18}O$ 的实验误差小于0.5‰, δD 的实验误差小于1.0‰。土壤含水量的测定用烘干称重法测定。土壤含盐率根据何文寿等(2010)的方法,用DDS30型电导仪(上海精研电子科技有限公司, 中国)测定。土壤pH值用PHS2000型笔式酸度仪(上海智光仪器仪表有限公司, 中国)测定。光合气体交换参数用CIRAS-1型便携式光合作用系统(PP system, Hitchin, UK),

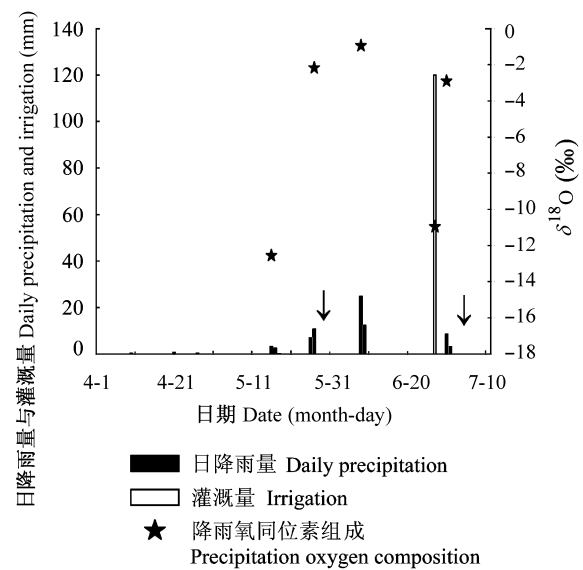


图1 2010年4月1日至7月10日西大滩降雨量与灌溉量。箭头指示的是土壤水、地下水、植物木质部水的采样时间。

Fig. 1 Daily precipitation and irrigation from 1 April to 5 July, 2010 in Xidatan. Arrow points to the data when soil water, groundwater, plant xylem water was sampled.

在土壤样品采集当天10:00–11:30测定各项光合生理指标。温度、湿度均为环境水平,大气CO₂浓度380 μmol·mol⁻¹左右,光合有效辐射(1 450 ± 50) μmol·m⁻²·s⁻¹。在每种灌木中部选择5片朝向相似的叶片,自然光下待数据稳定后保存6个数据。测定的光合气体交换参数有:净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)。瞬时水分利用效率(TE)用 P_n/T_r 计算。测定结束时采集测定枝叶,剪取叶室内测定部分,用扫描仪扫描后用Photoshop 6.0计算实际的叶面积,按计算后的新面积和光合仪叶室面积重新折算得出新的气体交换参数。西大滩的降雨资料从宁夏气象台查得。

1.2.3 数据分析

不同潜在水源如不同土层的土壤水和地下水对植物的贡献比例用IsoSource软件(免费获取地址 <http://www.epa.gov/wed/pages/models/stableIsotopes/isosource/isosource.htm>; Phillips & Gregg, 2003)分析。计算时来源增量(source increment)设为1%,质量平衡公差(mass balance tolerance)设为0.2%。虽然我们测定了11个土壤层次以分析灌木的水分来源,但这些源的数量太多,无法用IsoSource程序计算,同时,由于 $\delta^{18}O$ 及 δD 相关性较强,因此,我们计算灌木水分来源时只采用 $\delta^{18}O$ 。根据土壤水 $\delta^{18}O$ 的分

布特征, 我们把0–200 cm剖面的土层划分为0–20、20–80、80–140和140–200 cm, 再加上地下水共5个源。采用Excel 2003以及SPSS 11.5数据处理软件对实验数据进行方差分析、相关分析、计算标准偏差等统计分析, 用SigmaPlot 10.0进行图表绘制。

2 结果

2.1 降雨量和灌溉量以及雨水和灌溉水的稳定同位素组成

由图1可知, 西大滩4月份降雨稀少, 4月9日、4月20日和4月26日共发生了3次降雨, 但降雨量小于1 mm。5月有两次降雨, 5月15–16日和5月25–26日分别发生了6.1和17.8 mm的降雨, 雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -12.56‰ 和 -2.17‰ 。6月份有两次降雨, 6月7–8日和6月29–30日分别发生了37.2和11.8 mm的降雨, 雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -0.94‰ 和 -2.91‰ 。6月26日对各灌木林地进行了一次灌溉, 灌溉量为120 mm, 灌溉水来自附近的机井, 井水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.96‰ 。西大滩灌木林地在取样时段地下水位变化不大, 5月28日为2.5 m, 7月4日为2.8 m。

2.2 灌木林地不同水源及灌木木质部水的稳定同位素组成

由图2可以看出, 两次收集的雨水无论是 $\delta^{18}\text{O}$

值还是 δD 值均偏高, 机井水 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值偏低, 土壤水和地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值介于两者之间, 说明土壤水和地下水来自降雨和灌溉。深层(160–200 cm)土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值接近于地下水。

灌溉前0–200 cm土壤剖面含水量与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈显著负相关($-0.691, p < 0.05$), 说明蒸发作用导致土壤表层发生了较大程度的同位素分馏和重同位素的富集。0–140 cm土壤剖面氢氧同位素组成波动较大, 在120–140 cm处土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值及 δD 值出现一个峰值, 140 cm以下随着深度的加深连续降低, 到200 cm处达到最低值(接近地下水的同位素组成值)。灌溉后80 cm以上的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值比灌溉前明显偏低, 说明受到同位素组成值较低的灌溉水下渗影响。氢、氧同位素组成在80–140 cm土层比灌溉前明显升高, 在这个深度以下比灌溉前略有降低。无论灌溉前还是灌溉后, 表层土壤水与其他层次土壤水相比, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值明显偏高。

土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的坐标点大都落于中国西北干旱地区地方大气降雨线(arid Northwest China local meteoric water line, ANC LMWL) (Liu *et al.*, 2009)的右侧, 说明由于蒸发的影响使土壤水同位素发生了富集作用。井水坐标点离ANC LMWL最近, 说明井水受到蒸发的影响很小(图3A)。无论灌

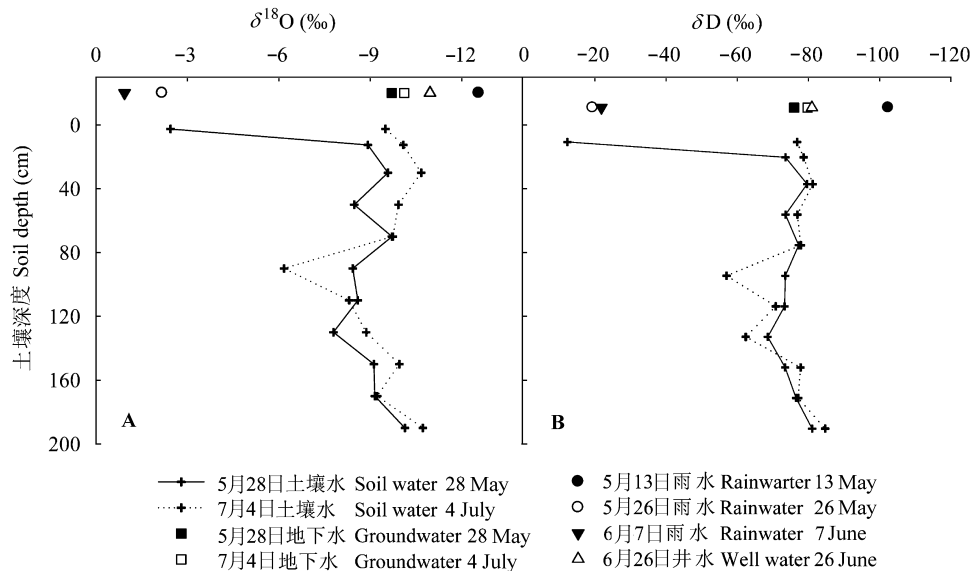


图2 西大滩0–200 cm土壤水、地下水、井水以及雨水 $\delta^{18}\text{O}$ (A)和 δD 值(B)的比较。

Fig. 2 Comparison on $\delta^{18}\text{O}$ (A) and δD values (B) of soil water (0–200 cm), groundwater, well water, and rainwater in Xidatan.

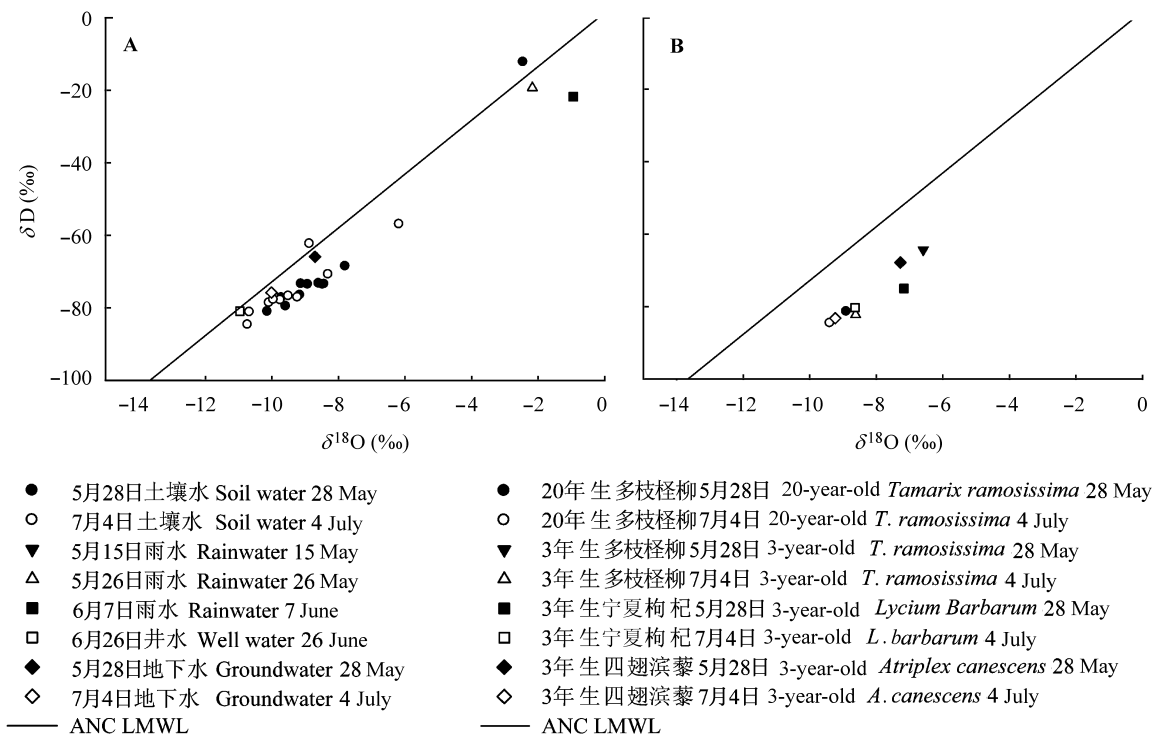


图3 试验点环境水源(A)及植物木质部水(B)的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 及其与中国西北干旱地区地方大气降雨线(ANC LMWL)的关系。
Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ and δD of environmental water (A) and plant xylem water (B) sampled at field site and their relationship with arid Northwest China local meteoric water line (ANC LMWL).

溉前还是灌溉后, 20年生的多枝怪柳与3年生灌木相比具有更低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值。灌溉后4种灌木的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值均有所降低, 20年生多枝怪柳降低程度最低。4种灌木木质部水同位素坐标点均落于ANC LMWL的右侧, 说明其水源同位素受到了蒸发富集作用的影响(图3B)。

2.3 土壤水氢氧同位素组成与土壤含水量、含盐量和pH值的关系

由表1可以看出, 灌溉前后土壤水 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 极显著正相关。灌溉前土壤含水量与土壤水 δD 及 $\delta^{18}\text{O}$ 均呈显著负相关, 且与 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关性强于与 δD 的相关性。土壤含盐量在灌溉后与土壤水氢氧同位素组成显著正相关, 但在灌溉前不相关。灌溉前的土壤pH值与 δD 及 $\delta^{18}\text{O}$ 显著负相关。

2.4 不同灌木对各潜在水源的利用率

在灌溉前, 3种人工种植的灌木, 即3年生多枝怪柳、3年生宁夏枸杞和3年生四翅滨藜主要利用表层土壤水, 平均利用率分别是70.1%、52.3%和48.9%, 对20–200 cm土壤水利用程度较低, 3年生四

翅滨藜比其他两种人工种植的灌木(3年生宁夏枸杞和3年多枝怪柳)对地下水的利用率高(13.4%)。与人工种植的灌木相比, 20年生多枝怪柳具有较高的深层土壤水和地下水利用率(29.40%和21.5%), 而对表层土壤水利用程度最低(5.1%) (表2)。

灌溉后, 3年生多枝怪柳和3年生宁夏枸杞对80–140 cm土壤水有较高的利用率(59.5%和58.8%), 对0–80 cm土壤水利用率较低。20年生多枝怪柳对地下水和深层土壤水(200 cm)的利用率最高, 分别为18.3%和18.7%, 其次为3年生四翅滨藜, 分别为16.5%和16.9%; 再次为3年生宁夏枸杞, 分别为10.0%和10.3%; 3年生多枝怪柳最低, 分别为9.9%和10.1%。20年生多枝怪柳对表层土壤水利用率最高(20.4%), 其次为3年生四翅滨藜, 为18.4% (表2)。

2.5 不同灌木光合气体交换参数的比较

灌溉后, 对于同一种灌木而言, P_n 、 G_s 、 T_r 和 TE 均有所提高。除3年生四翅滨藜外, 其他3种灌木的 P_n 在灌溉前后存在显著差异, 其中3年生多枝怪柳和3年生宁夏枸杞达到极显著水平。灌溉对20年生

表1 西大滩灌木林地不同时期土壤水氢氧同位素组成、含水量、含盐量及pH值间的关系

Table 1 Relationship among soil water hydrogen and oxygen composition, soil water content, soil salt content and pH during different periods in Xidatan shrubberies

	土壤水 δD Soil water δD 5-28	土壤水 $\delta^{18}O$ Soil water $\delta^{18}O$ 5-28	土壤水 δD Soil water δD 7-4	土壤水 $\delta^{18}O$ Soil water $\delta^{18}O$ 7-4	土壤含水量 Soil water content 5-28	土壤含水量 Soil water content 7-4	土壤含盐量 Soil salt content 5-28	土壤含盐量 Soil salt content 7-4	土壤pH Soil pH 5-28	土壤pH Soil pH 7-4
土壤水 δD Soil water δD 5-28	1.00									
土壤水 $\delta^{18}O$ Soil water $\delta^{18}O$ 5-28	0.99**	1.00								
土壤水 δD Soil water δD 7-4	0.04	0.17	1.00							
土壤水 $\delta^{18}O$ Soil water $\delta^{18}O$ 7-4	0.06	0.16	0.91**	1.00						
土壤含水量 Soil water content 5-28	-0.66*	-0.69*	-0.23	-0.16	1.00					
土壤含水量 Soil water content 7-4	-0.69*	-0.72**	-0.26	-0.17	0.93**	1.00				
土壤含盐量 Soil salt content 5-28	-0.38	-0.32	0.55	0.59*	0.32	0.32	1.00			
土壤含盐量 Soil salt content 7-4	0.02	0.08	0.58*	0.59*	0.27	0.12	0.71**	1.00		
土壤pH Soil pH 5-28	-0.64*	-0.66*	0.06	0.07	0.47	0.41	0.65*	0.38	1.00	
土壤pH Soil pH 7-4	-0.68*	-0.67*	-0.06	-0.14	0.54	0.62*	0.50	0.22	0.78**	1.00

5-28, 5月28日; 7-4, 7月4日。

5-28, 28 May; 7-4, 4 July. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

表2 西大滩4种灌木对各潜在水源的利用比例(平均值(最小值-最大值))

Table 2 Water uptake rate of potential sources for four shrubs in Xidatan (mean (minimum-maximum)) (%)

水分来源 Water source		灌木种类 Species of shrub						
		水源的同位素组成 Isotopic composition of water (%)		20年生多枝怪柳 20-year-old <i>Tamarix</i> <i>ramosissima</i>	3年生多枝怪柳 3-year-old <i>T.</i> <i>ramosissima</i>	3年生宁夏枸杞 3-year-old <i>Lycium</i> <i>barbarum</i>	3年生四翅滨藜 3-year-old <i>Atriplex</i> <i>canescens</i>	
		$\delta^{18}O$	δD					
5月28日 28 May	土壤深度 Soil depth (cm)	0-20	-5.69	-42.89	5.10 (0-20)	70.10 (58-81)	52.30 (35-66)	48.90 (31-63)
		20-80	-9.26	-76.79	28.70 (0-95)	6.60 (0-30)	10.50 (0-47)	11.30 (0-50)
		80-140	-8.27	-71.78	15.40 (0-60)	9.30 (0-42)	14.70 (0-65)	15.80 (0-69)
		140-200	-9.47	-77.00	29.40 (0-90)	6.20 (0-29)	9.90 (0-44)	10.60 (0-47)
	地下水 Groundwater		-8.70	-65.93	21.50 (0-100)	7.90 (0-36)	12.60 (0-55)	13.40 (0-59)
7月4日 4 July	土壤深度 Soil depth (cm)	0-20	-9.79	-77.72	20.40 (0-90)	11.00 (0-51)	11.20 (0-52)	18.40 (0-82)
		20-80	-10.11	-78.66	17.50 (0-77)	9.40 (0-44)	9.60 (0-45)	15.80 (0-70)
		80-140	-7.78	-63.37	25.00 (10-39)	59.50 (49-72)	58.80 (48-71)	32.40 (18-46)
		140-200	-9.97	-79.87	18.70 (0-82)	10.10 (0-47)	10.30 (0-48)	16.90 (0-75)
	地下水 Groundwater		-10.02	-75.79	18.30 (0-81)	9.90 (0-46)	10.00 (0-47)	16.50 (0-73)

多枝怪柳及3年生四翅滨藜的 G_s 无显著影响, 而对3年生多枝怪柳及3年生宁夏枸杞的 G_s 有显著影响。3年生多枝怪柳灌溉前后的 T_r 差异达到显著水平, 其他3种灌木灌溉前后蒸腾速率无显著差异。4种灌木的 TE 在灌溉前后无显著差异。

灌溉前, 20年生多枝怪柳的 P_n 、 G_s 和 T_r 显著高于其他3种灌木(图4A、5B、5C, $p < 0.001$)。灌溉后, 3年生四翅滨藜的 P_n 最高(图4A, $p < 0.001$), 但与20年生多枝怪柳无显著差异。无论灌溉前还是灌溉后, 3年生四翅滨藜的 TE 均高于其他3种灌木(图4D, $p < 0.01$)。

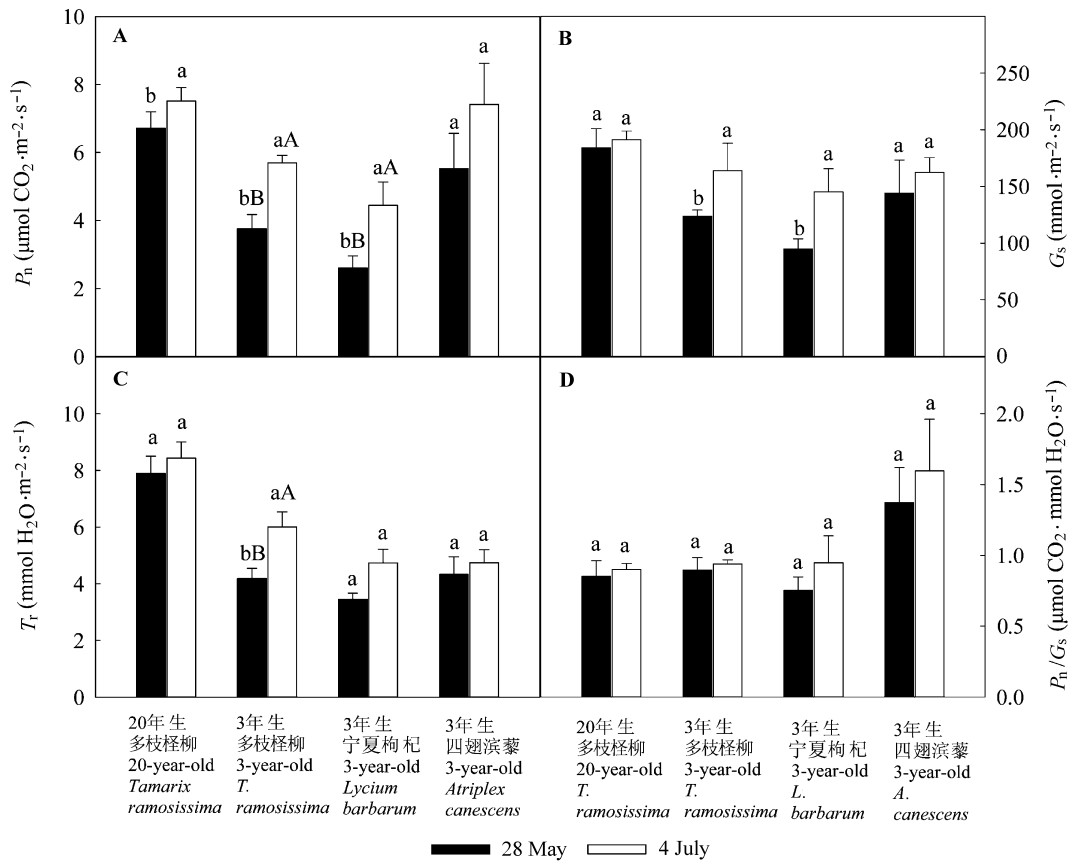


图4 灌溉前(2010年5月28日)后(2010年7月4日)4种灌木的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和瞬间水分利用效率(P_n/G_s) (平均值±标准偏差; $n = 6$)。不同小写字母表示灌溉前后差异显著($p < 0.05$), 不同大写字母表示灌溉前后差异极显著($p < 0.01$)。

Fig. 4 Net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and intrinsic water use efficiency (P_n/G_s) of four shrubs measured before irrigation (28 May) and after irrigation (4 July), 2010 (mean \pm SD, $n = 6$). Different lowercases and capital letters represent significant differences among different measuring time ($p < 0.05$ and $p < 0.01$), respectively.

3 讨论

应用稳定同位素方法确定不同深度土壤水对植物生长的贡献率的前提是: 土壤水的同位素组成要呈现出一个明显的垂直梯度变化(Eggemeyer *et al.*, 2009)。我们的试验结果也显示不同深度土壤水 $\delta^{18}O$ 和 δD 值存在较大差异, 并有一定规律性, 可以用来研究不同灌木对不同深度土壤水的利用情况。无论灌溉前还是灌溉后, 表层土壤水 $\delta^{18}O$ 及 δD 值与下面的土层相比明显偏高, 说明该层次受蒸发以及降雨的影响而发生的同位素富集现象。

3.1 灌溉前不同灌木水分来源的差异

灌溉前, 5 cm以下的土壤水 $\delta^{18}O$ 与 δD 值与表层相比明显偏低, 120–140 cm土壤水 $\delta^{18}O$ 值及 δD 值最高, 而从140 cm以下开始持续降低, 到200 cm处达

到最小值。由于120–140 cm土层位于整个土壤剖面的中部, 地面灌溉水和地下水向该层次补给量很小, 土壤水分长期处于非饱和状态, 土壤水不断由液态变为气态向地表运动, 持续的分馏富集作用导致该层次同位素组成值最高。通过相关分析发现0–200 cm土壤剖面含水量与土壤水 $\delta^{18}O$ 及 δD 值呈显著负相关($-0.691, p < 0.05$ 和 $-0.663, p < 0.05$), 同时, 整个土壤剖面水 $\delta^{18}O$ 值均比井水 $\delta^{18}O$ 值高, 说明蒸发作用导致土壤表层发生了较大程度的同位素分馏和重同位素的富集。

灌溉前, 3种3年生灌木主要利用浅层(0–20 cm)土壤水, 而20年生多枝桤柳对中层和深层土壤水利用程度较高。以上事实说明不同灌木有着不同的水分利用策略, 20年生与3年多枝桤柳在利用深层土壤水上的差异可能反映了多枝桤柳对深层土壤水

或地下水的利用与其生长年限有关。

作为兼性潜水水湿生植物(facultative phreato-phytes), 多枝桤柳可以保持水分不饱和的土壤环境中根系活力(Busch *et al.*, 1992; Shafroth *et al.*, 2000)。Busch和Smith (1995)及Pinay等(1992)认为, 桤柳(*Tamarix* spp.)不仅可以从深层土壤的高含水层吸收水分, 还能通过其较强的忍耐干旱能力利用低含水土层中的水分。本研究中, 西大滩地区5月25–26日发生了17.8 mm的降雨, 而3年生多枝桤柳对0–20 cm土壤水利用率达到73%, 高于其他两种同龄灌木, 说明多枝桤柳苗期浅层根系有较高的吸水活力, 对近期降雨反应比较敏感。

在本研究中, 20年生多枝桤柳对中深层土壤水的利用率高于对浅层土壤水的利用率, 说明其根系已深达地下水层, 这与前人的研究结果, 即多枝桤柳为深根型根系, 其生存和生理活动的维持主要依赖于地下水的报道相一致(许皓和李彦, 2005; 蒋礼学和李彦, 2008; 徐贵青和李彦, 2009)。我们的试验还发现20年生多枝桤柳的 P_n 、 G_s 和 T_r 显著高于其他3种灌木, 并且灌溉前后光合气体交换参数差异较小, 这一事实从另一侧面支持了这一结论。

Sperry和Hacke (2002)研究发现四翅滨藜属深根性植物, 具有地下水湿生植物的特征, 同时发现其浅层侧根木质部空穴现象(cavitation)亦高于其他沙生灌木, 从而降低了其利用近期夏季降雨的能力。Hodgkinson等(1978)和Lin等(1996)报道了四翅滨藜对旱后人工模拟降雨没有明显的反应, 并分析可能与其较低的浅层根系水导有关。在我们的研究结果中, 3年生四翅滨藜对0–20 cm土层水分的利用率低于多枝桤柳和宁夏枸杞3年生灌木; 而对深层土壤水及地下水的利用率又高于这两种灌木的事实可能也反映了它这一特性。

由于四翅滨藜具有 C_4 光合途径, 光饱和点高、 P_n 高, 从而有较高的水分利用效率(Lin *et al.*, 1996; 王玉魁等, 2007)。本研究中, 3年生四翅滨藜比其他3种灌木具有更高的 TE , 表明其可以维持较高的碳获取能力, 促进根系向下生长, 从而保证水分供应。

3.2 灌溉后不同灌木水分来源的差异

灌溉后80 cm以上剖面土壤水氢、氧同位素组成值明显偏低, 说明其受到灌溉水(同位素组成值偏低)下渗的影响。土壤剖面的含盐量与 δD 及 $\delta^{18}O$ 值显著正相关(0.58和0.59), 一方面是蒸发作用使土

壤含盐量上升的同时也使土壤水同位素发生富集作用, 另一方面可能是由于灌溉水的淋洗作用使浅层土壤含盐量下降, 同时, 同位素组成值偏低的灌溉水也使该层次土壤水同位素组成值下降, 从而导致两者之间正相关。

80–100 cm土壤水氢、氧同位素组成比灌溉前显著升高, 这似乎有悖常理。土壤水向下迁移的“活塞流”有可能解释这一现象: 土壤中的小孔隙如同“活塞”一样, 新水推动旧水沿着水力梯度在这些“活塞”中向下运动, 新水替代旧水过程及新水与旧水的混合作用影响土壤剖面氢、氧同位素组成(Tang & Feng, 2001)。在本试验中, 灌溉时富含重同位素的浅层土壤水在重同位素含量较低的灌溉水推动下向下运动, 当水力梯度减小到一定程度时, 这部分水会滞留在某一个层次而使这一层次土壤水同位素组成值变大。灌溉后100 cm以下土壤含盐量显著增加, 暗示较淡的灌溉水推动含盐量较高的旧水向下运动而使土壤剖面的盐分重新分布, 这从另一个侧面印证了上述推论的合理性。同时, 灌溉水由多孔介质网络入渗或是由地下水径流等途径影响地下水同位素组成值, 深层(140–200 cm)土壤水受到地下水的补充其 δD 及 $\delta^{18}O$ 值与地下水较为接近, 这也可以解释灌溉后深层土壤水(140–200 cm)同位素组成值显著下降的现象。

徐贵青和李彦(2009)报道: 在降水引发的湿润-干旱周期中, 多枝桤柳的水分生理参数对降水无响应, 表明多枝桤柳为深根植物, 主要利用地下水和深层土壤水。我们的试验结果中, 20年生的多枝桤柳与其他3种人工种植的灌木相比对地下水和深层土壤水有较高的利用率, 同时, 20年生多枝桤柳各项光合气体交换参数对灌溉的反应不如其他3种灌木明显, 这也暗示其生长主要依赖深层土壤水及地下水这些稳定水源。与20年生的多枝桤柳相反, 3年生多枝桤柳对中层土壤水(80–140 cm)的依赖程度最高, 暗示不同年龄的多枝桤柳用水策略有显著差异。这可能是由于人工灌溉影响多枝桤柳苗期根系的形态, 而植物根系本身具有感知土壤水分梯度的能力, 并且有向土壤湿润区域发展的向水性(Simonneau & Habib, 1994; 单立山等, 2007), 灌溉后中层土壤水分含量较高, 而影响导致该土层根系的活力较高。植物根系分布点取决于土壤水在水平和垂直方向的分布和根系形态可塑性。

Lin等(1996)对四翅滨藜实施了夏季和秋季人工模拟降雨,发现其黎明前及午后木质部水势仍然很低,暗示其对降雨没有显著的反应,然而,作者并没有指出四翅滨藜的水分来源。在我们的实验中,灌溉后3年生四翅滨藜对表层和深层土壤水的利用程度高于另两种3年生人工灌木(多枝怪柳和宁夏枸杞),说明其根系生长速度较快,能够有效地利用深层土壤水分。同时,又保持了较高的表层根系活力。灌溉前四翅滨藜 G_s 增幅较小, T_r 也没有显著提高,暗示其生长发育主要依赖地下水,因地下水的来源较为稳定,从而导致四翅滨藜对灌溉的反应不显著。

灌溉后3年生多枝怪柳及3年生宁夏枸杞的 P_n 、 G_s 和 T_r 增幅较大,说明在灌溉前这两种灌木水分状况较差,它们通过减小气孔开度、降低蒸腾速率以增强对水分胁迫的适应。灌溉后水分状况改善,其气孔开度变大, P_n 也相应升高。

4 结论

本研究利用稳定同位素技术分析了宁夏总部浅地下水埋深地区4种盐生灌木水分来源的差异,并运用IsoSource模型计算不同灌木灌溉前后对不同深度土壤水及地下水的利用比例。土壤水 $\delta^{18}O$ 和 δD 值随深度不同呈现规律性变化,蒸发作用及灌溉措施对土壤剖面氢氧同位素组成产生显著影响。不同灌木在灌溉前后具有分异性的水分利用特征,灌溉前,3种3年生灌木主要利用浅层(0–20 cm)土壤水,而20年生多枝怪柳对深层土壤水及地下水利用程度较高。20年生与3年生多枝怪柳在利用深层土壤水上的差异可能反映了多枝怪柳对深层土壤水或地下水的利用与其生长年限有关。幼龄多枝怪柳对浅层不饱和土壤有较强的忍耐干旱能力而保持较高的根系吸水活力,成年的多枝怪柳通过发达的根系从深层土壤的水分饱和区吸收水分,从而证明它是一种典型的兼性潜水湿生植物(facultative phreatophytes)。

灌溉后,20年生的多枝怪柳和3年生四翅滨藜对表层和地下水的利用程度高于另两种3年生人工灌木(多枝怪柳和宁夏枸杞),说明这两种灌木对灌溉的反应不敏感。因此,在地下水位较高的银川平原北部地区,栽培利用四翅滨藜改良盐碱地时可以在其较早的生长时期(3年生)适当减少灌溉,以发挥

其吸收地下水的的作用。而对于多枝怪柳则要等到成年,根系发展到一定程度时才能减少灌溉。

致谢 国家自然科学基金项目(31160478)、国家“十二五”科技支撑项目课题(2011BAC07B03)、教育部科学技术研究重点项目(211195)、国家重点基础研究发展计划(2012CB723206)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题(10501-287)、宁夏自然科学基金项目(NZ1142)和宁夏大学科学研究基金项目((E)NDZR09-10)资助。

参考文献

- Allison GB, Hughes MW (1983). The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 60, 157–173.
- Busch DE, Ingraham NL, Smith SD (1992). Water uptake in woody riparian phreatophytes of the southwestern United States: a stable isotope study. *Ecological Applications*, 2, 450–459.
- Busch DE, Smith SD (1995). Mechanisms associated with decline of woody species in riparian ecosystems of the southwestern U.S. *Ecological Monographs*, 65, 347–370.
- Caldwell MM, Dawson TE, Richards JH (1998). Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 113, 151–161.
- Cheng GY (程广有), Hou J (侯杰), Tang XJ (唐晓杰), Zhou XY (周喜云) (2007). Salt-alkaline tolerance of three species of *Lycium* by tissue culture. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 35(11), 47–49. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- Dawson TE (1993). Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 95, 565–574.
- 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_4 grasses in a semi-arid grassland. *Tree Physiology*, 29, 157–169.
- Ehleringer JR, Phillips SL, Schuster WSF, Sandquist DR (1991). Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia*, 88, 430–434.
- Ehleringer JR, Dawson TE (1992). Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell*

- & *Environment*, 15, 1073–1082.
- Ellsworth PZ, Williams DG (2007). Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant and Soil*, 291, 93–107.
- Gong WC (公维昌), Zhuang L (庄丽), Zhao WQ (赵文勤), Tian ZP (田中平) (2009). Anatomical structure and ecological adaptability of two kinds of halophytes (*Haloxylon ammodendron* Chenopodiaceae and *Tamarix ramosissima* Amaranthaceae). *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 6764–6771. (in Chinese with English abstract)
- He WS (何文寿), Liu YC (刘阳春), He JY (何进宇) (2010). Relationships between soluble salt content and electrical conductivity for different types of salt-affected soils in Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 28, 111–116. (in Chinese with English abstract)
- Hodgkinson KC, Johnson PS, Norton BE (1978). Influence of summer rainfall on root and shoot growth of a cold-winter desert shrub, *Atriplex confertifolia*. *Oecologia*, 34, 353–362.
- Jiang LX (蒋礼学), Li Y (李彦) (2008). Comparison on architecture characteristics of root systems and leaf traits for three desert shrubs adapted to arid habitat. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 28, 1118–1124. (in Chinese with English abstract)
- Khan MA, Ungar IA, Showalter AM (2000). Effects of salinity on growth, water relations and ion accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* var. *stocksii*. *Annals of Botany*, 85, 225–232.
- Li PJ (李鹏菊), Liu WJ (刘文杰), Wang PY (王平元), Li JT (李金涛) (2008). Plant water use strategies in a limestone tropical seasonal moist rainforest in Xishuangbanna, SW China. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), 30, 496–504. (in Chinese with English abstract)
- Li Q (李茜), Sun ZJ (孙兆军), Qin P (秦萍) (2007). Summary of Ningxia saline status and improved measures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 35, 10808–10810, 10813. (in Chinese with English abstract)
- Lin GH, Phillips SL, Ehleringer JR (1996). Monsoonal precipitation responses of shrubs in a cold desert community on the Colorado Plateau. *Oecologia*, 106, 8–17.
- Liu JR, Song XF, Sun XM, Yuan GF, Liu X, Wang SQ (2009). Isotopic composition of precipitation over Arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin. *Journal of Geographical Sciences*, 19, 164–174.
- Liu MS (刘茂松), Lu XZ (鲁小珍), Wang HJ (王汉杰), Deng CH (邓村恒), Ren RR (任蓉蓉), Tang RN (唐荣南) (2001). The environmental effectiveness and countermeasure of human activity in Xidatan of Pingluo in Ningxia Autonomous Region. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)* (南京林业大学学报(自然科学版)), 25(3), 83–88. (in Chinese with English abstract)
- Matoh T, Watanabe J, Takahashi E (1986). Effects of sodium and potassium salts on the growth of a halophyte. *Soil Science and Plant Nutrition*, 32, 451–459.
- McKell CM (1994). Salinity tolerance in *Atriplex* species: fodder shrubs of arid lands. In: Pessaraki P ed. *Handbook of Plant and Crop Stress*. Marcel Dekker Inc., New York. 497–503.
- Meinzer FC, Clearwater MJ, Goldstein G (2001). Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies. *Environmental and Experimental Botany*, 45, 239–262.
- Nie YP (聂云鹏), Chen HS (陈洪松), Wang KL (王克林) (2011). Seasonal variation of water sources for plants growing on continuous rock outcrops in limestone area of Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 35, 1029–1037. (in Chinese with English abstract)
- Phillips DL, Gregg JW (2003). Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 136, 261–269.
- Pinay G, Fabre A, Vervier P, Gazelle F (1992). Control of C, N, P distribution in soils of riparian forests. *Landscape Ecology*, 6, 121–132.
- Ren W (任葳), Luo TB (罗廷彬), Wang BJ (王宝军), Su FC (苏逢春) (2004). Biological improvement of saline and alkaline land in Xinjiang. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 22(4), 211–214. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- Shafroth PB, Stromberg JC, Patten DT (2000). Woody riparian vegetation response to different alluvial water table regimes. *Western North American Naturalist*, 60, 66–76.
- Shan LS (单立山), Zhang XM (张希明), Chai ZP (柴仲平), Wei J (魏疆), Yan HL (闫海龙), Xu H (许浩) (2007). Response of the distribution of roots of *Tamarix ramosissima* seedlings to irrigation with different volumes. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 24, 213–218. (in Chinese with English abstract)
- Simonneau T, Habib R (1994). Water uptake regulation in peach trees with split-root systems. *Plant, Cell & Environment*, 17, 379–388.
- Sperry JS, Hacke UG (2002). Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. *Functional Ecology*, 16, 367–378.
- Tang KL, 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 HJ (王恒俊), Li SC (李仕成), Zhang SG (张淑光), Lü HM (吕惠民), Xie YS (谢永生) (1989). On the division of land renovation and the major measures in Ningxia Autonomous Region. *Acta Conservations Soil et Aquae Sinica* (水土保持学报), 3, 60–74. (in Chinese with English abstract)

Wang YK (王玉魁), Yan YX (闫艳霞), Ci LJ (慈龙骏), Wang BP (王保平), Cui LJ (崔令军), Yang CW (杨超伟) (2007). Anatomical structure and C₄ photosynthetic characteristics of seven *Atriplex* species. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 43(A01), 72–76.

Xu GQ (徐贵青), Li Y (李彦) (2009). Roots distribution of three desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 130–137.

Xu H (许皓), Li Y (李彦) (2005). Water use strategies and corresponding leaf physiological performance of three desert shrubs. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 25, 1309–1316. (in Chinese with English abstract)

Zhang LB (张立宾), Song RR (宋日荣), Wu X (吴霞) (2008). Salt tolerance capability of *Tamarix chinensis* and the effects on the improvement of coastal saline soil. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 36, 5424–5426. (in Chinese with English abstract)

Zhang YH (张永宏) (2005). Desalination effects of salttolerant plants growing in alkali-saline soil in Ningxia. *Gansu Agricultural Science and Technology* (甘肃农业科技), (3), 48–49. (in Chinese with English abstract)

Zhao KF (赵可夫), Fan H (范海), Jiang XY (江行玉), Song J (宋杰) (2002). Improvement and utilization of saline soil by planting halophytes. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 8, 31–35. (in Chinese with English abstract)

Zhou YD (周雅聘), Chen SP (陈世莘), Song WM (宋维民), Lu Q (卢琦), Lin GH (林光辉) (2011). Water-use strategies of two desert plants along a precipitation gradient in northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 35, 789–800. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 李彦 责任编辑: 李敏

作者更正

由于本人疏忽, 发表在《植物生态学报》2012年36卷6期572–577页的文章《能源植物杂交狼尾草对NaCl胁迫的响应及其耐盐阈值》遗漏了基金资助项目信息: 国家自然科学基金(30870138和31070158)和国家科技支撑计划项目(2009BADA7B05)资助。特此更正。

山东师范大学 陈敏