

古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态

戴岳^{1,2,3} 郑新军^{1,2} 唐立松^{1,2} 李彦^{1,2*}

¹中国科学院新疆生态与地理研究所, 阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆阜康 831500; ²中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; ³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 植物的水分来源是荒漠地区植物水分关系研究的重要方面, 有助于理解荒漠植物对干旱环境的适应。为了研究古尔班通古特沙漠主要建群种梭梭(*Haloxylon ammodendron*)生长季的水分利用动态, 以及其对发生在不同时期相似量级降水脉冲的响应, 利用稳定性同位素技术测量了梭梭小枝木质部水、降水、0–300 cm不同土层的土壤水和地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。水源依据深度划分为4个: 浅层土壤水(0–40 cm), 中层土壤水(40–100 cm), 深层土壤水(100–300 cm)和地下水。然后, 应用IsoSource模型计算了梭梭对潜在水源的利用比例。结果表明: 4月份, 梭梭主要利用浅层土壤水, 利用比例为62%–95%; 5–9月份梭梭主要利用地下水, 利用比例为68%–100%。梭梭对不同时期发生的两场相似量级的降水具有不同程度的响应。5月22日, 6.7 mm降水后第1天, 梭梭对土壤水的吸收达到最大值, 由降水前的9.8%增长为降水后的40.4%, 同时降低了对地下水的吸收, 由降水前的83%–98%下降为42%–81%。8月31日7 mm降水后, 梭梭对土壤水的吸收没有增加, 仍然保持对地下水的高比例利用, 达71%–98%。低的土壤含水量可能抑制了表层根系的活性, 导致梭梭对降水不敏感。由冬季融雪和春季降水补给的浅层土壤水和地下水是梭梭种群可利用的两个重要水源。梭梭的水分利用动态反映了其对干旱环境的适应。

关键词 地下水, IsoSource模型, 降水脉冲, 稳定性同位素, 水分来源

Dynamics of water usage in *Haloxylon ammodendron* in the southern edge of the Gurbantünggüt Desert

DAI Yue^{1,2,3}, ZHENG Xin-Jun^{1,2}, TANG Li-Song^{1,2}, and LI Yan^{1,2*}

¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Fukang National Field Science Observation and Research Station of Desert Ecology, Fukang, Xinjiang 831500, China; ²State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; and ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Plant water use is an important aspect of plant-water relations in desert regions, and is vital in understanding the adaptation of desert species to arid environment. *Haloxylon ammodendron* is a dominant plant species in the Gurbantünggüt Desert, China. Its water use pattern has an important effect on water balance of the local ecosystem and plant community composition. This study aims to investigate the dynamics of water usage in *H. ammodendron* and its response to soil water fluctuations resulting from precipitation pulses.

Methods Oxygen stable isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) were measured for xylem water, soil water in different soil layers (0–300 cm depth), precipitation and groundwater. Four potential water sources were classified: shallow (0–40 cm), middle (40–100 cm) and deep soil water (100–300 cm), and groundwater. The possible ranges of potential water sources used by *H. ammodendron* were calculated using the IsoSource model.

Important findings Main water sources for *H. ammodendron* shifted from the shallow soil water in April to the groundwater during May to September. In April, the contributions of shallow soil water were in the range of 62%–95%, and the possible ranges of middle and deep soil water and groundwater were 0–8%, 0–15% and 0–38%, respectively. However, during May to September, the contribution of shallow soil water decreased drastically while that of groundwater increased rapidly. Contributions of groundwater were in the range of 68%–100%. *Haloxylon ammodendron* responded differently to two similar precipitation pulses occurred in different months. After the 6.7 mm precipitation pulse on May 22, the usage of soil water increased from 9.8% prior to the event to maximum at 40.4% one day after rainfall (May 23), while the usage of groundwater decreased from 83%–98% to 42%–81%. After 7 mm precipitation pulse on August 31, the usage of soil water was almost unchanged and the usage of groundwater was still up to 71%–98%, implying that roots of *H. ammodendron* in the upper soil layer are

inactive due to the long-lasting low soil water content. Hence, *H. ammodendron* seemed to be insensitive to the August precipitation pulse. The shallow soil water recharged by snowmelt and precipitation in spring and groundwater are two important water sources for *H. ammodendron*. Dynamics of water usage in *H. ammodendron* reflects its adaptation to this water-limiting desert environment.

Key words groundwater, IsoSource model, precipitation pulse, stable isotope, water source

水是荒漠生态系统限制植物定居、固碳作用、植被分布和养分循环的关键因子(Noy-Meir, 1973; Ehleringer & Cooper, 1988; Stephenson, 1990; Reynolds *et al.*, 1999)。在干旱区, 降水和地下水是植物可利用的两个重要水源。年降水格局在塑造植物适应性方面起着重要作用(Schwinning & Ehleringer, 2001), 植物的代谢活动同降水脉冲密切相连, 其吸收和利用降水脉冲的能力部分取决于降水时间、强度和量级以及土壤的水力特性, 降水脉冲转化为可利用的土壤水分脉冲后才能被植物根系吸收(Fravalini *et al.*, 2005)。当发生季节性的水分短缺或长时间无降水时, 有着深根习性的植物通过吸收深层土壤水或地下水以忍耐或躲避干旱(Zencich *et al.*, 2002; Chimner & Cooper, 2004)。我国西北干旱区的水资源稀缺, 仅凭天然降水无法满足一些植物正常的生长需求, 地下水成为植物用水的重要组成部分(钟华平等, 2002; 徐海量等, 2004; 赵文智和刘鹄, 2006)。

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为藜科梭梭属超旱生小半乔木, 由梭梭构成的植物群系是亚洲荒漠区分布最广的植被类型(胡式之, 1963)。在我国, 梭梭主要分布于准噶尔盆地、塔里木盆地东部和北部、河西走廊和嘎顺戈壁、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠和乌兰布和沙漠等地(胡式之, 1963)。梭梭的生态幅较宽, 对生境基质的要求不严格, 多分布于山麓洪积扇、淤积平原、固定的沙丘沙地、砂砾质和砾质戈壁等干旱荒漠环境(张立运, 2002)。国内学者对梭梭的干旱适应性以及抗旱机理方面进行了大量的研究, 研究结果表明梭梭具有束缚水/自由水比值大、同化枝保水力高、渗透调节能力强、水分利用效率高等特点(周培之等, 1988; 侯天侦和梁远强, 1991; 杨明等, 1994; 苏培玺等, 2005), 有助于梭梭在干旱的环境下生存。在梭梭的水分利用来源方面, 许皓等(2007)的研究表明, 梭梭主要利用降水形成的浅层土壤水维持生存, 较强的气孔控制和有效的形态调节是其适应降水变化的主要机制。近年来,

梭梭出现大面积退化现象, 而地下水位下降与梭梭的退化程度间有着密切的关系(王继和马全林, 2003; 刘斌等, 2010; 曾晓玲等, 2012), 暗示着地下水在梭梭生长过程中发挥着重要作用。然而, 在自然生境中, 梭梭对地下水的利用情况仍不明确。

古尔班通古特沙漠位于准噶尔盆地中央, 是我国面积最大的固定、半固定沙漠, 冬季存在的稳定性积雪, 使得古尔班通古特沙漠不同于我国的其他沙漠(陈昌笃等, 1983)。融雪期水、热的协调, 为沙漠植物的萌发和生长提供了重要保证(黄培祐, 1991)。在全球气候变化的影响下, 20世纪80年代后期新疆的气候出现变暖增湿的趋势(胡汝骥等, 2001)。进入21世纪的近十余年来, 一方面新疆的总降水继续保持增加趋势(戴新刚等, 2013), 另一方面极端降水事件表现出波动上升的趋势(赵丽等, 2014), 这些都对干旱区的植被产生了显著影响(赵霞等, 2011)。作为古尔班通古特沙漠的主要建群种, 梭梭的水分利用对当地生态系统的水分平衡和植物群落组成产生了重要影响(李彦和许皓, 2008; Li *et al.*, 2010)。了解自然生境中梭梭的水分利用动态对预测气候变化下梭梭群落的响应至关重要。本研究应用稳定性同位素技术分析自然生境中梭梭的水分利用动态以及变化特征, 研究结果对认识干旱区气候变化下植物的适应性, 以及对于干旱区植被保护、恢复与重建都具有参考价值。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站(简称阜康站)的北沙窝试验区(44.37° N, 87.92° E, 海拔435 m)进行。该试验区位于古尔班通古特沙漠南缘, 在大陆性干旱气候的影响下, 研究区域冬季寒冷, 夏季炎热, 昼夜温差大, 蒸发强, 年平均气温6.6 °C, 年潜在蒸散量2 000 mm, 年降水量100–150 mm。稳定积雪日数100–160天, 最大积雪深度多在20 cm以上。沙漠中几乎无地

表径流, 地下水位边缘 < 5 m, 试验区地下水位深约 4 m。土壤以固定、半固定风沙土为主(钱亦兵等, 2007)。固定风沙土主要分布于垄间低地及沙垄中下部, 半固定风沙土多分布于沙垄中部和中上部。垄间主要植物有梭梭、绢蒿(*Seriphidium* sp.), 以及短命植物尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrrhynchum*)、条叶庭荠(*Alyssum linifolium*)、齿稈草(*Schismus arabicus*)等, 有生物结皮发育。沙垄顶部主要植物有白梭梭(*Haloxylon persicum*)、淡枝沙拐枣(*Calligonum leucocladum*), 以及多年生植物小花糖芥(*Erysimum cheiranthoides*)、粗柄独尾草(*Eremurus inderiensis*)等(范连连等, 2012)。研究区梭梭自然生长密度为 $530 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均高度 192 cm、盖度 20%–50%, 主要分布在丘间低地(张立运和陈昌笃, 2002; 孙鹏飞等, 2010)。

气象数据从阜康站在古尔班通古特沙漠南缘长期试验样地安装的自动气象站(Campbell Scientific, Logan, USA)获得。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

2013年4月22日–9月15日在试验区选取4株生长良好、形态相近、具有代表性的成年梭梭植株。植株的平均高度、冠幅半径和基径分别是(2.07 ± 0.14) m, (1.07 ± 0.02) m和(11 ± 1.67) cm。每月中旬取样一次, 每株每次取1个样, 共4个重复。采样方法: 剪取非绿色的栓化小枝(直径0.1–0.3 cm, 长3–5 cm), 去皮后迅速装入采样瓶并用封口膜密封, 然后放入随身携带的冰盒中, 带回实验室冷冻保存。

在每株植物的下方用土钻取0–300 cm土层的土壤样品, 取样时间同植物的取样时间一致。在0–20 cm土层每10 cm取样, 20–100 cm土层每20 cm取样, 100–300 cm土层每40 cm取样, 每个土层取4个重复。每层所取土样分成两份, 一份迅速装入样品瓶, 用封口膜密封后放入携带的冰盒, 带回实验室冷冻保存用于分析土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; 另一份土壤样品装入铝盒, 带回实验室用烘干法测量土壤质量含水量。

收集试验期间的降水, 每月20号在样地附近的观测井中取地下水样品。降水样和地下水样在分析前均用孔径为0.22 μm 的过滤头过滤, 将过滤后样品装入样品瓶, 然后用封口膜密封, 并放置在2 °C冰箱冷藏以备分析使用。

为研究梭梭对发生在不同时期且量级相似的降

水脉冲的响应, 追踪了两场发生在不同时期且量级相似的降水脉冲后梭梭的水分利用变化。5月22日6.7 mm和8月31日7 mm降水后的第1、2、4、6天取梭梭非绿色的栓化小枝样。获取植物样品的同时, 钻取样株下方0–100 cm土层的土壤样品。在0–20 cm土层每10 cm取样, 20–100 cm土层每20 cm取样, 每个土层取4个重复。100–300 cm土层的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化采用当月中旬的取样值替代。土样处理如前面的描述, 一部分用于获得土壤质量含水量, 另一部分用于分析土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

临界土壤含水量的确定参见郑新军和李彦(2009)的研究, 本文假设当垄间沙地土壤水势高于–2.6 MPa时, 土壤含水量达到梭梭生理活动的水分补偿点(Xu & Li, 2008)。

1.2.2 样品测定

在阜康站进行样品测定。先用低温真空抽提法抽提植物和土壤样品中的水分, 将抽提出的梭梭小枝木质部水(简称木质部水)和土壤水分别装入玻璃样品瓶, 然后用基于稳定同位素红外光谱技术的液态水同位素分析仪(LWIA, DLT-100, Los Gatos Research, Mountain View, USA)测量样品的氧稳定同位素比率:

$$\delta^{18}\text{O} = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 是样品中元素的重轻同位素丰度之比, 如 $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}$, R_{standard} 是国际通用标准物(氢、氧稳定同位素采用v-SMOW)的重轻同位素丰度之比, 如 $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}$ 。由于利用低温真空蒸馏抽提技术获得的植物水中可能会混入与水分子具有相似光谱吸收峰的甲醇和乙醇类物质, 易造成稳定同位素红外光谱的测量误差超过仪器精度(Schultz *et al.*, 2011; 孟宪菁等, 2012)。为了减小测量误差, 结合Los Gatos公司的光谱分析软件确定甲醇和乙醇类物质污染程度的光谱度量值, 建立了 $\delta^{18}\text{O}$ 的光谱污染校正公式, 并将校正后的值与传统的稳定同位素质谱仪(FinniganMAT253, Thermo finnigan, Bremen, Germany)测量值进行了交叉验证, 表明基于稳定同位素红外光谱技术获得的梭梭木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值可以被准确地校正, 具体步骤参见Wu等(2013)的研究。

1.2.3 水源划分

基于梭梭木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 以及土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值土层间以及月份间的变异, 共划分了4个水源, 划分依据如下:

(1)浅层土壤水(0–40 cm)是同位素值波动最大的土层, $\delta^{18}\text{O}$ 值随季节和深度显著变化;

(2)中层土壤水(40–100 cm) $\delta^{18}\text{O}$ 值随土壤深度的增加减小, 月份间变化相对缓和;

(3)深层土壤水(100–300 cm) $\delta^{18}\text{O}$ 值随土壤深度的增加变化较小, 月份间差异不显著;

(4)地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对稳定。

运用IsoSource模型计算梭梭对各水源的可能利用比例。该模型以基于同位素质量平衡的多元线性混合方程为基础, 用于计算多个水源时植物对各水源的利用比例, 也可用于大气污染物的来源、动物的食物来源确定等(Phillips & Gregg, 2003)。以本研究为例, 初步判定梭梭的水分来源后, 将梭梭木质部水和各潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值代入模型, 构建质量平衡公式, 如下式所示:

$$\delta_M = f_A \delta_A + f_B \delta_B + f_C \delta_C + f_D \delta_D \quad (2)$$

$$1 = f_A + f_B + f_C + f_D \quad (3)$$

式中: f_A 、 f_B 、 f_C 、 f_D 为各水源所占比例, δ_A 、 δ_B 、 δ_C 、 δ_D 为各水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, δ_M 为梭梭木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

模型运行过程中自动为梭梭对每个水源的利用比例赋值, 比例增加的步长视为来源增量(source increment), 如1%或2%, 各水源被利用比例的组合和为100% (公式3), 利用迭代方法计算可能的比例组合。当各水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值加权值之和等于梭梭木质

部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(公式2), 或小于某一可接受范围(质量平衡公差, mass balance tolerance)时, 视为符合条件的比例组合。模型运行结果中, 植物对各水源的利用比例是一个范围(最大值与最小值)。本研究中, 模型的来源增量设为1%, 质量平衡公差设为0.1‰, 来源增量和质量平衡公差的具体设定方法参见Phillips和Gregg (2003)的文献。

1.2.4 数据分析

利用SPSS 16.0对数据进行分析, 使用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较土壤剖面不同层次土壤含水量和土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值月份间差异以及降水前后差异的显著性, 比较梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值月份间差异以及降水前后差异的显著性, 如果月份间差异显著或降水前后差异显著, 则应用最小显著差数法(LSD)进一步比较。利用独立样本 t 检验(independent-sample t -tests)对比不同时期发生的两场降水脉冲下, 土壤含水量和土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的差异, 在0.05水平检验其显著性。用Origin 8.5进行图形绘制。

2 结果

2.1 降水分布和降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征

观测期间(1月1日–9月30日), 研究区的总降水量为137.3 mm, 降水分布不均匀(图1), 其中4月的

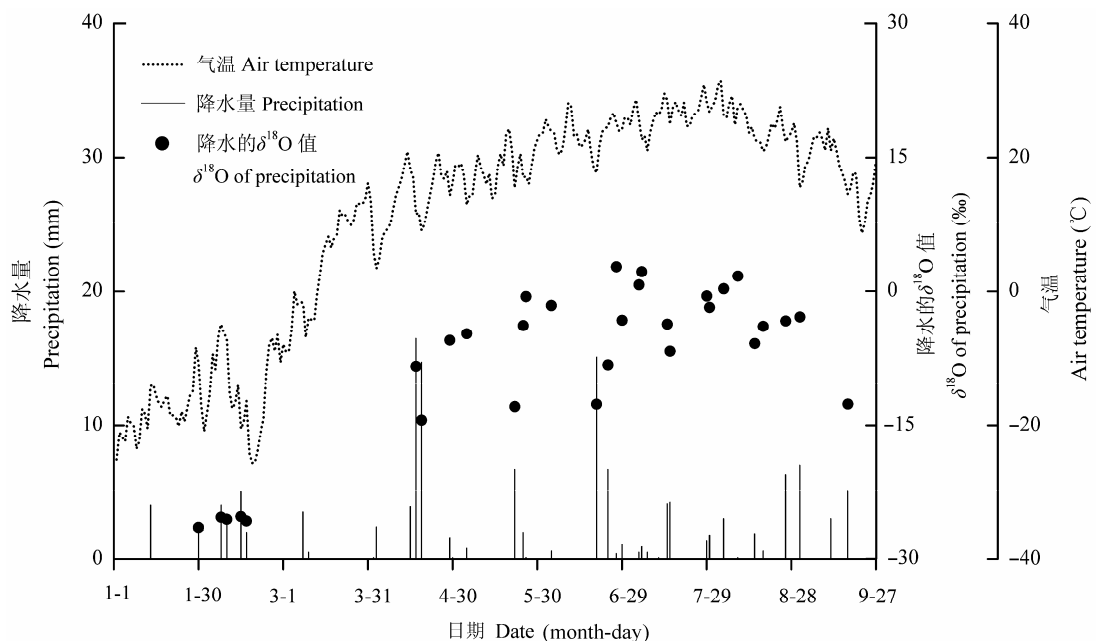


图1 古尔班通古特沙漠南缘1–9月的气温、降水量和降水对应的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

Fig. 1 Average daily air temperature and precipitation and mean $\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation during January to September 2013 in the southern edge of the Gurbantünggüt Desert.

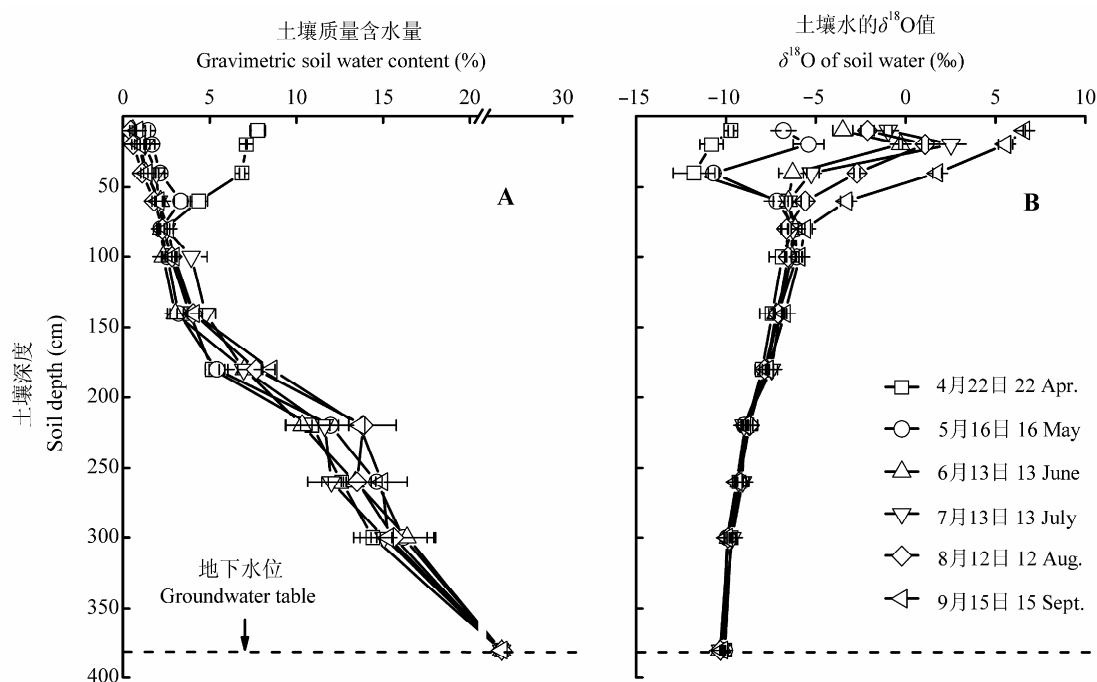


图2 古尔班通古特沙漠南缘不同深度土壤质量含水量(A)和土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(B)的月变化(平均值 \pm 标准误差, $n = 4$)。
Fig. 2 Variations in vertical profiles of gravimetric soil water content (A) and oxygen stable isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of soil water (B) in different months in the southern edge of the Gurbantünggüt Desert (mean \pm SE, $n = 4$).

降水量最多, 为39.3 mm, 降水(<5 mm)占总降水频次的80%。降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围大, 介于 -26.48‰ 和 2.73‰ 之间, 且表现出显著的季节变化特征, 冬季降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最小, 夏季降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值达到最大值。

2.2 土壤含水量和土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征

图2展示了研究区0–300 cm土层的土壤含水量和土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的月变化。0–40 cm土层的土壤含水量4月最高(图2A), 平均值为7.15%, 之后, 土壤含水量下降迅速, 8月达到最小值, 平均值为0.82%。40–100 cm土层的土壤含水量波动相对缓和, 由4月的3.16%下降到9月的2.53%, 随深度的增加逐渐增大。100–300 cm土层的土壤含水量月间差异不显著($p = 0.432$), 但随深度的增加显著增大, 由100–140 cm处的3.83%上升到260–300 cm处的15.48%。0–40 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值4月最小(图2B), 平均值为 -11.01‰ , 和5月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异不显著($p = 0.179$), 但显著低于6–9月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($p < 0.006$); 6、7、8月浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值月间差异不显著($p > 0.353$); 9月浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最大, 平均值为 3.92‰ , 显著高于其他各月($p < 0.02$)。40–100 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值4–8月差异不显著($p > 0.454$), 9月的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于其他各月(p

< 0.038)。100–300 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值月间差异不显著($p = 0.991$), 并且随深度的增加变化不大。

2.3 梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征

图3展示了梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的月变化特征。梭梭木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值4月最低, 平均值为

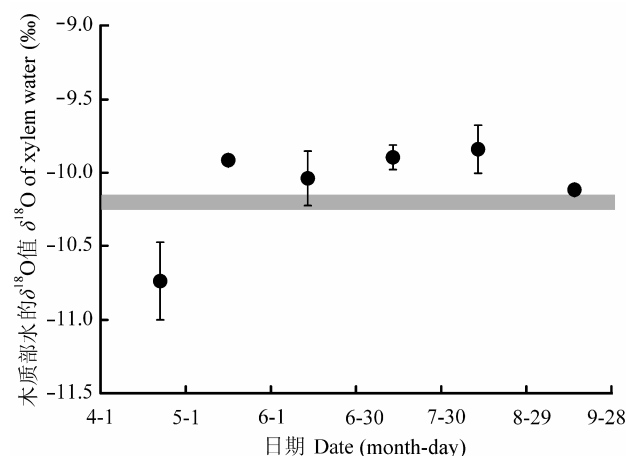


图3 生长季梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征(平均值 \pm 标准误差, $n = 4$)。浅灰色横条代表地下水的月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值(平均值 \pm 标准误差, $n = 6$)。

Fig. 3 Variations in the mean $\delta^{18}\text{O}$ values of xylem water in *Haloxylon ammodendron* during growing season (mean \pm SE, $n = 4$). The light grey bar represents the monthly average of $\delta^{18}\text{O}$ values in groundwater (mean \pm SE, $n = 6$).

-10.74‰, 显著低于其他各月($p < 0.05$)。5-9月, 梭梭木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值月间差异不显著($p > 0.21$)。地下水有着较为稳定的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 平均值为-10.21‰。

2.4 梭梭对各水源的利用比例

梭梭对各水源的利用比例存在明显的转化(表1)。4月, 梭梭对浅层土壤水的利用比例占主导, 为62%-95%, 对中层、深层土壤水和地下水的利用比例分别为0-8%, 0-15%和0-38%。5-9月, 梭梭对地下水的利用比例占主导, 为68%-100%。

2.5 降水脉冲后土壤含水量的变化

5月22日, 在6.7 mm降水后, 表层10 cm的土壤含水量比降水前显著增加($p < 0.012$), 且能持续2-3天(图4A), 第4天土壤含水量和降水前差异不显著($p = 0.177$)。10-40、40-100 cm土层的土壤含水量降水前后差异不显著(10-40 cm土层, $p = 0.927$; 40-100 cm土层, $p = 0.439$)。

8月31日, 在7 mm降水后, 表层10 cm的土壤含水量比降水前显著增加($p < 0.019$), 且能持续至降水后第6天(图4B)。10-40 cm土层的土壤含水量在降

水后第1天显著上升($p = 0.001$), 之后保持稳定。40-100 cm土层的土壤含水量降水前后差异不显著($p = 0.465$)。

同5月22日6.7 mm降水后的土壤含水量变化相比, 8月31日7 mm降水后表层10 cm的土壤含水量波动幅度更大; 10-40 cm土层的土壤含水量极显著小于5月($p < 0.001$), 更接近于土壤临界含水量(1.15%); 40-100 cm土层的土壤含水量显著小于5月($p = 0.011$)。

2.6 降水脉冲后土壤水和梭梭木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化

5月22日, 6.7 mm降水($\delta^{18}\text{O}$: -12.95‰)后, 表层10 cm的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值由降水前的-6.79‰下降为降水后的-7.92‰, 降水后第4天随时间显著上升($p < 0.001$, 图5A); 10-40和40-100 cm土层的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值降水前后无显著差异(10-40 cm土层, $p = 0.812$; 40-100 cm土层, $p = 0.471$)。

8月31日, 7 mm降水($\delta^{18}\text{O}$: -2.83‰)后, 表层10 cm的 $\delta^{18}\text{O}$ 值由降水前的-2.11‰上升为降水后的

表1 梭梭对各潜在水源利用比例的月变化(%) (平均值(最小值-最大值))
Table 1 Proportions of feasible water sources (%) for *Haloxylon ammodendron* in different months (mean (min-max))

水分来源 Water source	各潜在水源的利用比例 Proportions of feasible water source (%)					
	4月22日	5月16日	6月13日	7月13日	8月12日	9月15日
浅层土壤水 Shallow soil water (0-40 cm)	82.7 (62-95)	3.9 (0-15)	1.5 (0-6)	1.5 (0-6)	1.6 (0-6)	0.1 (0-1)
中层土壤水 Middle soil water (40-100 cm)	2.1 (0-8)	1.5 (0-7)	2.6 (0-9)	3.6 (0-12)	3.9 (0-13)	0.8 (0-3)
深层土壤水 Deep soil water (100-300 cm)	4.2 (0-15)	4.4 (0-17)	6.5 (0-22)	8.1 (0-26)	9.9 (0-32)	3.3 (0-10)
地下水 Groundwater	11.0 (0-38)	90.2 (83-98)	89.4 (78-96)	86.7 (74-96)	84.6 (68-95)	95.7 (90-100)

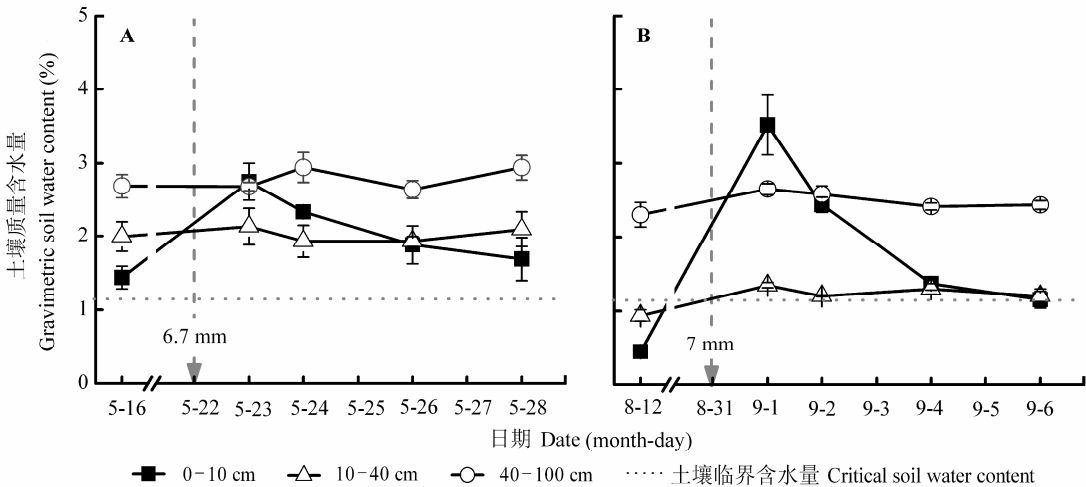


图4 5月22日6.7 mm (A)和8月31日7 mm (B)降水脉冲下土壤质量含水量的变化(平均值±标准误差, $n = 4$)。箭头所指为降水日期。
Fig. 4 Responses of gravimetric soil water content to 6.7 mm precipitation (A) on May 22 and 7 mm precipitation (B) on August 31 (mean ± SE, $n = 4$). Arrows indicate the day of precipitation.

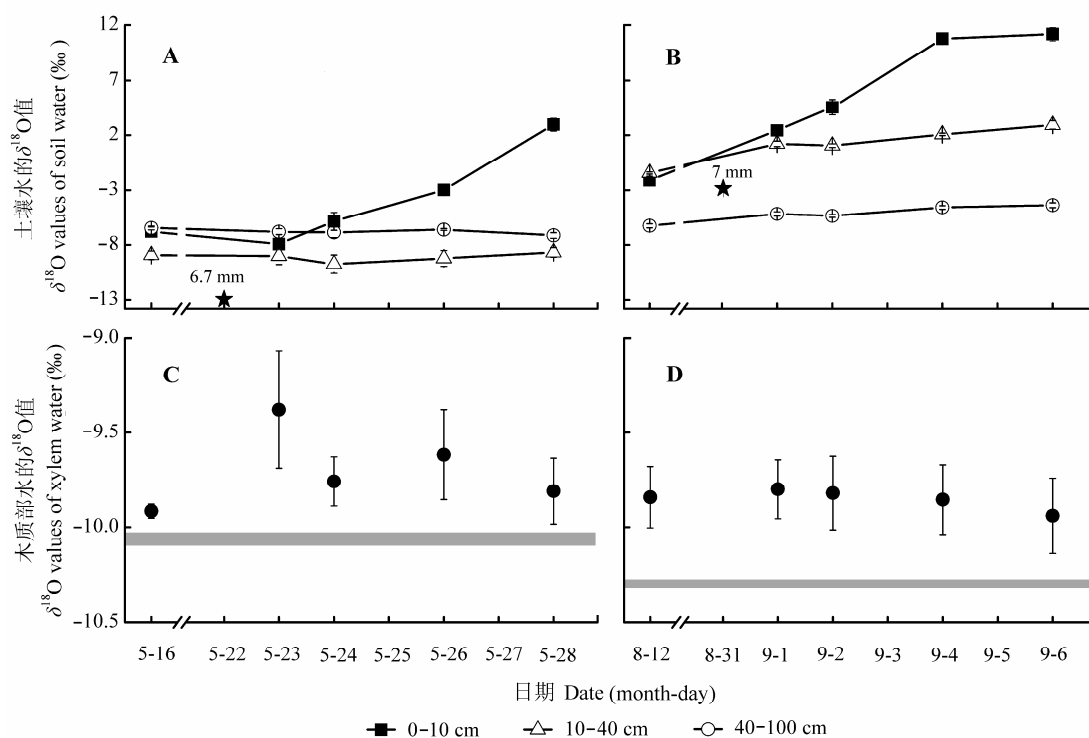


图5 5月22日6.7 mm和8月31日7 mm降水脉冲下土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值(A, B)和梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值(C, D)的变化(平均值 \pm 标准误差, $n = 4$)。五角星所在位置为降水发生的日期以及对应的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。灰色横条代表当月地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(平均值 \pm 标准误差, $n = 4$)。
Fig. 5 Responses of $\delta^{18}\text{O}$ values of soil water (A, B) and $\delta^{18}\text{O}$ values of xylem water in *Haloxylon ammodendron* (C, D) to 6.7 mm precipitation on May 22 and 7 mm precipitation on August 31 (mean \pm SE, $n = 4$). Stars indicate the day of precipitation and $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation, and gray horizontal bands represent $\delta^{18}\text{O}$ values of groundwater in May and August, respectively (mean \pm SE, $n = 4$).

2.44‰, 之后随时间显著上升($p < 0.001$, 图5B), 降水后第4天表层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值达到最大, 之后保持稳定; 10–40 cm土层的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值由降水前的 -1.44‰ 上升为降水后的 1.22‰ , 降水后第2天保持恒定, 之后显著上升($p < 0.05$)。40–100 cm土层的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值由降水前的 -6.26‰ 上升为降水后的 -5.17‰ , 降水后第2天保持恒定, 之后显著上升($p < 0.05$)。

同5月22日6.7 mm降水后土壤各层的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化相比, 8月31日7 mm降水后0–10、10–40和40–100 cm土层的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均显著大于5月(0–10 cm土层, $p = 0.018$; 10–40 cm土层, $p < 0.001$; 40–100 cm土层, $p = 0.002$)。

5月22日6.7 mm降水后第1天, 植物样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值由降水前的 -9.92‰ 上升为 -9.38‰ , 偏离地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 之后又逐渐下降接近地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图5C)。降水前后植物样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异不显著($p = 0.408$)。8月31日7 mm降水后, 植物样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动平缓(图5D), 降水前后差异不显著($p = 0.982$)。

2.7 降水脉冲后梭梭对各水源的利用比例

5月22日6.7 mm降水后第1天, 梭梭对土壤水的利用比例由降水前的9.8%增长为降水后的40.4%; 对地下水的利用比例由降水前的83%–98%下降为42%–81%。之后, 梭梭对土壤水的利用比例下降, 而对地下水的利用比例逐渐上升, 在降水后第6天, 对地下水的利用比例达到和降水前相似的水平(图6A)。8月31日7 mm降水后, 梭梭对土壤水的利用比例几乎没有变化, 仍然保持对地下水的高比例利用, 为71%–98% (图6B)。

3 讨论

气象条件是制约降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的重要因素, 随着气象条件的季节变化, 降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也会发生相应的变化(Yao *et al.*, 2013)。新疆地处中纬度内陆地区(35° – 50° N), 降水主要受西风带的影响(Yao *et al.*, 2013)。冬季, 降水的水汽来自西风环流输送和高纬度的极地气团(Tian *et al.*, 2007)。由于沿途水汽通过降水过程使得自身的 $\delta^{18}\text{O}$ 值不断贫化,

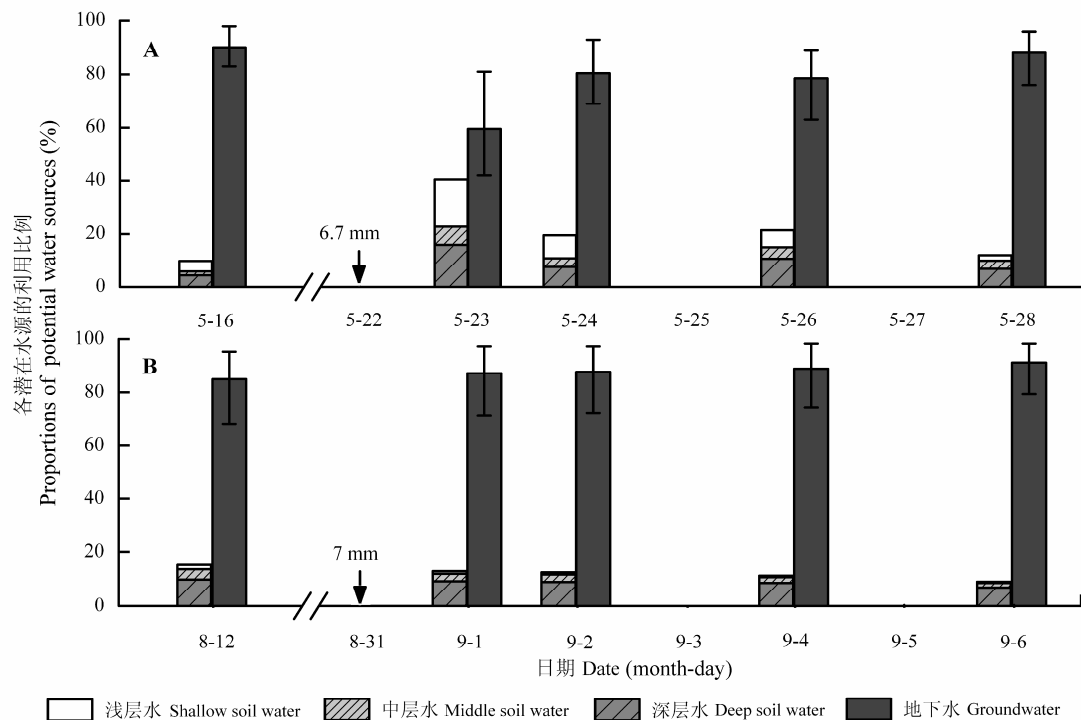


图6 5月22日6.7 mm (A)和8月31日7 mm (B)降水脉冲下梭梭对各潜在水源利用比例的变化。箭头所指为降水日期。棒的上下限代表由IsoSource模型计算的梭梭对地下水利用比例的最大值和最小值。

Fig. 6 Variations in water use patterns in *Haloxylon ammodendron* in response to 6.7 mm precipitation on May 22 (A) and 7 mm precipitation on August 31 (B). Arrows indicate the day of precipitation. The bounds of bars represent the minimum/maximum proportions of groundwater calculated using the IsoSource model.

再加上冬季气温低,蒸发量小,沿途水汽补充较少,使得降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低。夏季,降水的水汽主要来源于西风环流输送(Tian *et al.*, 2007)。夏季大陆内部气温高,蒸发量大,且有部分 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高的局地水汽进入降水云团,使得降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏高(侯典炯等, 2011)。本研究区不同季节大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变幅较大,表现出夏季富集、冬春季贫化的特征(图1),和新疆地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化特征相符。降水变化同水气输送量密切相关,在一定程度上决定了新疆各季节的降水量(史玉光和孙照渤, 2008)。21世纪近10年来新疆的总降水量保持增加趋势,但各季节的增加幅度不同。春、夏季降水呈弱的非线性下降趋势,秋、冬季降水增加趋势明显。这一现象将导致降水量的季节分配发生改变,冬半年降雪可能增加(戴新刚等, 2013)。新疆的极端降水事件表现出波动上升的趋势,准噶尔盆地的极端降水量上升趋势也较为显著(赵丽等, 2014)。植被活动总体表现为生长季的延长和生长加速(赵霞等, 2011)。

降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化引起了浅层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$

值的季节差异。本研究中春季(4–5月)浅层土壤水受到冰雪融水的补给, $\delta^{18}\text{O}$ 值偏小;夏秋季(6–9月),浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则显著偏大,呈现富集现象(图2B)。土壤水的稳定同位素同时受到蒸发的影响,且随土壤深度的增加,蒸发效应减小(Barnes & Allison, 1988)。因此,随着土壤深度的增加,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化幅度逐渐减小(图2B)。地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对稳定(图3)。Ehleringer和Dawson (1992)的研究表明地下水的同位素值代表了年降水同位素值的加权平均。Mathieu和Bariac (1996)研究了半干旱气候下黏土的水分运移,表明降水可以通过土壤非饱和带中的大孔隙和快速渗流路径补给地下水。在古尔班通古特沙漠南缘,没有直接证据显示当年有春季的积雪融水补给地下水,地下水的稳定性同位素值可能代表了多年降水的平均状态(李晖等, 2008)。

本研究中梭梭在生长季早期(4月),土壤水分充足(图2A),主要利用由冬、春季降水补给的浅层土壤水,利用比例达62%–95% (表1),同吕金岭等(2013)研究发现随着融雪后浅层土壤含水量的上升

梭梭明显利用浅层土壤水的现象相符。冬季降水的增加(戴新刚等, 2013)以及气温和地温的上升(胡列群等, 2014)可能会导致梭梭的生长季提前并促进梭梭对浅层土壤水的吸收。且梭梭一般在春季末期(4月下旬至5月上旬)开花, 此时充足的浅层土壤水源也能保障梭梭的正常开花。梭梭在生长季中后期(5–9月), 表层土壤水蒸发加剧, 土壤水分亏缺得不到及时补充(图2A), 转向主要吸收地下水, 对地下水的利用比例达68%–100% (表1)。许皓等(2007)的研究发现, 黏土上生长的梭梭大部分根系分布在表层, 少数根系分布在深层, 主要水源是降水补给的浅层土壤水。然而, 在极为干旱的条件下, 梭梭可能通过重黏土毛细管吸水作用利用深层土壤水或地下水。同生长在黏土上的梭梭相比, 生长在沙土上的梭梭在土壤深层发育了更深更庞大的根系(Xu & Li, 2008), 较容易获取地下水, 能够根据浅层土壤含水量的多少调节根系对浅层土壤水和地下水的利用比例。地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在整个生长季的变化不大, 具有稳定的水源供应, 对地下水的利用使梭梭能够耐受夏秋季长时间的干旱。一些在浅土层和深土层均有根系分布的旱生植物也能够调节自身的水分利用来源, 在降水多、表层土壤含水量高的湿润季节主要利用浅层土壤水, 在降水少、表层土壤含水量低的旱季则转向利用深层土壤水或地下水(Yang *et al.*, 2011; 周雅聘等, 2011; 周海等, 2013)。

梭梭对发生在不同时期相似量级的降水具有不同的敏感性。对在春季土壤水分条件较好时发生的降水较为敏感, 表现为降水后对土壤水利用的增加(图6A)。对在夏末秋初土壤水分亏缺严重时发生的降水不敏感, 表现为降水前后对土壤水的利用几乎不变, 仍然保持对地下水高比例利用(图6B)。高的土壤温度可能抑制根系对水分的吸收, 引起植物对相同降水量级响应不同(Lin *et al.*, 1996)。我们的研究表明, 夏末秋初的表层土壤含水量严重亏缺, 接近于梭梭的临界土壤含水量(图4B), 显著小于春季相似量级降水下的土壤含水量(图4A), 暗示着夏末秋初低的土壤含水量可能抑制了表层根系的活性, 导致梭梭对降水的敏感性。极端降水发生时间的不确定性使得梭梭对降水引起的土壤含水量变化的响应也具有不确定性。若极端降水发生在春季, 可能会促进梭梭对浅层土壤水分的吸收, 有利于梭梭生长; 如果发生在夏季或秋季, 则可能对梭梭的水分

利用影响较小。但如果出现连续降水, 梭梭分布在土壤表层的根系被激活, 则会提升其对降水的利用, 这方面仍需进一步研究。

4 结论

梭梭在生长季对不同水源的吸收具有明显的季节转换现象。生长季早期(4月), 梭梭主要吸收浅层土壤水。生长季中后期(5–9月), 梭梭以地下水为主要水分来源。由冬季融雪和春季降水补给的浅层土壤水和地下水是古尔班通古特沙漠南缘梭梭种群可利用的两个重要水源。在水分缺乏的荒漠生态系统, 梭梭的根系通过感知土壤含水量的变化调整对各水源的吸收。梭梭的水分利用动态反映了其对干旱环境的适应。在新疆降水格局改变的背景下, 古尔班通古特沙漠冬季降水的增加, 将有利于梭梭种群的发展。而地下水位的下降将危及梭梭的生存。

基金项目 国家自然科学基金面上项目(41371079和41171049)。

致谢 在野外试验与室内分析工作中得到中国科学院阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站的老师和同学的支持和帮助, 谨此致谢。

参考文献

- Barnes CJ, Allison GB (1988). Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Journal of Hydrology*, 100, 143–176.
- Chen CD, Zhang LY, Hu WK (1983). The basic characteristics of plant communities, flora and their distribution in the sandy district of Gurbantungut. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 7, 89–98. (in Chinese with English abstract) [陈昌笃, 张立运, 胡文康 (1983). 古尔班通古特沙漠的沙地植物群落、区系及其分布的基本特征. 植物生态学与地植物学丛刊, 7, 89–98.]
- 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.
- Dai XG, Wang P, Zhang KJ (2013). A study on precipitation trend and fluctuation mechanism in northwestern China over the past 60 years. *Acta Physica Sinica*, 62, 12920. (in Chinese with English abstract) [戴新刚, 汪萍, 张凯静 (2013). 近60年新疆降水趋势与波动机制分析. 物理学报, 62, 12920.]
- Ehleringer JR, Cooper TA (1988). Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants. *Oecologia*, 76, 562–566.

- Ehleringer JR, Dawson TE (1992). Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 15, 1073–1082.
- Fan LL, Ma J, Wu LF, Xu GQ, Li Y, Tang LS (2012). Response of the herbaceous layer to snow variability at the south margin of the Gurbantonggut Desert of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 126–135. (in Chinese with English abstract) [范连连, 马健, 吴林峰, 徐贵青, 李彦, 唐立松 (2012). 古尔班通古特沙漠南缘草本层对积雪变化的响应. 植物生态学报, 36, 126–135.]
- Fravolini A, Hultine KR, Brugnoli E, Gazal R, English NB, Williams DG (2005). Precipitation pulse use by an invasive woody legume: the role of soil texture and pulse size. *Oecologia*, 144, 618–627.
- Hou DJ, Qin X, Wu JK, Du WT (2011). Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Ürümqi. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(10), 136–142. (in Chinese with English abstract) [侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 杜文涛 (2011). 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究. 干旱区资源与环境, 25(10), 136–142.]
- Hou TZ, Liang YQ (1991). Research on physiological ecology of photosynthesis and water relation of saxoul forest in Gan Jia Hu area of Xinjiang. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 15, 141–150. (in Chinese with English abstract) [侯天侦, 梁远强 (1991). 新疆甘家湖梭梭林的光合、水分生理生态的研究. 植物生态学与地植物学学报, 15, 141–150.]
- Hu LQ, Wu PF, Liang FC, Zhang WH (2014). Analyzing the effect of snow cover in spring and winter and air temperature on frozen ground depth in Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36, 48–54. (in Chinese with English abstract) [胡列群, 武鹏飞, 梁凤超, 张伟航 (2014). 新疆冬春季积雪及温度对冻土深度的影响分析. 冰川冻土, 36, 48–54.]
- Hu RJ, Fan ZL, Wang YJ, Yang Q, Huang YY (2001). Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years. *Arid Land Geography*, 24, 97–103. (in Chinese with English abstract) [胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 杨青, 黄玉英 (2001). 近50年新疆气候变化对环境影响评估. 干旱区地理, 24, 97–103.]
- Hu SZ (1963). The *Haloxylon ammodendron* desert in the northwest region of China. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1, 81–108. (in Chinese with English abstract) [胡式之 (1963). 中国西北地区的梭梭荒漠. 植物生态学与地植物学丛刊, 1, 81–108.]
- Huang PY (1991). Relations between living things and environment in desert of Zhungeer Basin. *Chinese Journal of Ecology*, 10, 6–10. (in Chinese with English abstract) [黄培佑 (1991). 准噶尔盆地荒漠生物类群与环境的关系. 生态学杂志, 10, 6–10.]
- Li H, Jiang ZC, Zhou HF, Wang Y, Cui TS, Li Y, Luo WQ (2008). Variation characteristics of oxygen and hydrogen stable isotope in precipitation, soil water and groundwater in the Junggar Basin—taking Fukang Station of desert ecology as a case. *Research of Soil and Water Conservation*, 15(5), 105–108. (in Chinese with English abstract) [李晖, 蒋忠诚, 周宏飞, 王月, 崔天顺, 李艺, 罗为群 (2008). 准噶尔盆地降水、土壤水和地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化特征——以中国生态系统研究网络阜康站为例. 水土保持研究, 15(5), 105–108.]
- Li J, Zhao CY, Song YJ, Sheng Y, Zhu H (2010). Spatial patterns of desert annuals in relation to shrub effects on soil moisture. *Journal of Vegetation Science*, 21, 221–232.
- Li Y, Xu H (2008). Water and carbon balances of *Haloxylon ammodendron*: integrated study at physiological, plant and community level. *Arid Land Geography*, 31, 313–323. (in Chinese with English abstract) [李彦, 许皓 (2008). 梭梭对降水的响应与适应机制——生理、个体与群落水平碳水平衡的整合研究. 干旱区地理, 31, 313–323.]
- 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 B, Liu T, Li L, Zhao XJ, Han ZQ, Ma DW (2010). Cause of large-scale *Haloxylon ammodendron* degeneration in west Gurbantonggut Desert. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 637–642. (in Chinese with English abstract) [刘斌, 刘彤, 李磊, 赵新俊, 韩志全, 马大伟 (2010). 古尔班通古特沙漠西部梭梭大面积退化原因. 生态学杂志, 29, 637–642.]
- Lü JL, Zhang XM, Lü CY, Liu GJ (2013). A preliminary study on the water sources of *Haloxylon ammodendron* at the southern edge desert of Junggar Basin, China. *Journal of Desert Research*, 33, 110–117. (in Chinese with English abstract) [吕金岭, 张希明, 吕朝燕, 刘国军 (2013). 准噶尔盆地南缘荒漠区梭梭维持水源初步研究. 中国沙漠, 33, 110–117.]
- Mathieu R, Bariac T (1996). An isotopic study (^2H and ^{18}O) of water movements in clayey soils under a semiarid climate. *Water Resources Research*, 32, 779–789.
- Meng XJ, Wen XF, Zhang XY, Han JY, Sun XM, Li XB (2012). Potential impacts of organic contaminant on $\delta^{18}\text{O}$ and δD in leaf and xylem water detected by isotope ratio infrared spectroscopy. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 20, 1359–1365. (in Chinese with English abstract) [孟宪菁, 温学发, 张心昱, 韩佳音, 孙晓敏, 李晓波 (2012). 有机物对红外光谱技术测定植物叶片和茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的影响. 中国生态农业学报, 20, 1359–1365.]
- Noy-Meir I (1973). Desert ecosystems: environment and

- producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 25–51.
- Phillips DL, Gregg JW (2003). Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 136, 261–269.
- Qian YB, Wu ZN, Zhang LY, Zhao RF, Wang XY, Li YM (2007). Vegetation-environment relationships in Gurbantunggut Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 2802–2811. (in Chinese with English abstract) [钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 赵锐锋, 王小燕, 李有民 (2007). 古尔班通古特沙漠植被与环境的关系. *生态学报*, 27, 2802–2811.]
- Reynolds JF, Virginia RA, Kemp PR, de Soyza AG, Tremmel DC (1999). Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development. *Ecological Monographs*, 69, 69–106.
- Schultz NM, Griffis TJ, Lee XH, Baker JM (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, Ehleringer JR (2001). Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems. *Journal of Ecology*, 89, 464–480.
- Shi YG, Sun ZB (2008). Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang. *Plateau Meteorology*, 27, 310–319. (in Chinese with English abstract) [史玉光, 孙照渤 (2008). 新疆水汽输送的气候特征及其变化. *高原气象*, 27, 310–319.]
- Stephenson NL (1990). Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *The American Naturalist*, 135, 649–670.
- Su PX, An LZ, Ma RJ, Liu XM (2005). Kranz anatomy and C_4 photosynthetic characteristics of two desert plants, *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum*. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 1–7. (in Chinese with English abstract) [苏培玺, 安黎哲, 马瑞君, 刘新民 (2005). 荒漠植物梭梭和沙拐枣的花环结构及 C_4 光合特征. *植物生态学报*, 29, 1–7.]
- Sun PF, Zhou HF, Li Y, Li ML (2010). Trunk sap flow and water consumption of *Haloxylon ammodendron* growing in the Gurbantunggut Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 6901–6909. (in Chinese with English abstract) [孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 李妙伶 (2010). 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量. *生态学报*, 30, 6901–6909.]
- Tian LD, Yao TD, MacClune K, White JWC, Schilla A, Vaughn B, Vachon R, Ichiyang K (2007). Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources. *Journal of Geophysical Research*, 112, D10112.
- Wang JH, Ma QL (2003). Study on restoration strategies, characteristics and status of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* communities at the edge of Minqin oasis. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 23, 2107–2112. (in Chinese with English abstract) [王继和, 马全林 (2003). 民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策. *西北植物学报*, 23, 2107–2112.]
- Wu Y, Zhou H, Zheng XJ, Li Y, Tang LS (2013). Seasonal changes in the water use strategies of three co-occurring desert shrubs. *Hydrological Processes*, doi: 10.1002/hyp.10114.
- Xu GQ, Li Y (2008). Rooting depth and leaf hydraulic conductance in the xeric tree *Haloxylon ammodendron* growing at sites of contrasting soil texture. *Functional Plant Biology*, 35, 1234–1242.
- Xu H, Li Y, Zou T, Xie JX, Jiang LX (2007). Ecophysiological response and morphological adjustment of *Haloxylon ammodendron* towards variation in summer precipitation. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 5019–5028. (in Chinese with English abstract) [许皓, 李彦, 邹婷, 谢静霞, 蒋礼学 (2007). 梭梭(*Haloxylon ammodendron*)生理与个体用水策略对降水改变的响应. *生态学报*, 27, 5019–5028.]
- Xu HL, Song YD, Wang Q, Ai M (2004). The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 400–405. (in Chinese with English abstract) [徐海量, 宋郁东, 王强, 艾合买提 (2004). 塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响. *植物生态学报*, 28, 400–405.]
- 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 M, Dong HJ, Yang WB, E ED, Yang MR (1994). Physiological and ecological characteristics of four kinds of psammophytes and their functions in the dune-fixing forestation. *Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, (2), 4–7. (in Chinese) [杨明, 董怀军, 杨文斌, 额尔敦, 杨茂仁 (1994). 四种沙生植物的水分生理生态特征及其在固沙造林中的意义. *内蒙古林业科技*, (2), 4–7.]
- Yao TD, Masson-Delmotte V, Gao J, Yu WS, Yang XX, Risi C, Sturm C, Werner M, Zhao HB, He Y, Ren W, Tian LD, Shi CM, Hou SG (2013). A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations. *Reviews of Geophysics*, 51, 525–548.
- Zencich SJ, Froend RH, Turner JV, Gailitis V (2002). Influence of groundwater depth on the seasonal sources of water accessed by *Banksia* tree species on a shallow, sandy coastal aquifer. *Oecologia*, 131, 8–19.
- Zeng XL, Liu T, Zhang WB, Sun QM, Shen XY, Si LM (2012). Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Gurbantunggut Desert.

- Acta Ecologica Sinica*, 32, 1490–1501. (in Chinese with English abstract) [曾晓玲, 刘彤, 张卫宾, 孙钦明, 沈雪莹, 司朗明 (2012). 古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响. *生态学报*, 32, 1490–1501.]
- Zhang LY (2002). *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum* in the desert of Xinjiang. *Plants*, (5), 4–5. (in Chinese with English abstract) [张立运 (2002). 新疆荒漠中的梭梭和白梭梭(上). *植物杂志*, (5), 4–5.]
- Zhang LY, Chen CD (2002). On the general characteristics of plant diversity of Gurbantunggut sandy desert. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1923–1932. (in Chinese with English abstract) [张立运, 陈昌笃 (2002). 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. *生态学报*, 22, 1923–1932.]
- Zhao L, Yang Q, Han XY, Liu YL (2014). Spatial and temporal differences of extreme precipitation during 1961–2009 in Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 34, 550–557. (in Chinese with English abstract) [赵丽, 杨青, 韩雪云, 刘燕丽 (2014). 1961–2009年新疆极端降水事件时空差异特征. *中国沙漠*, 34, 550–557.]
- Zhao WZ, Liu H (2006). Recent advances in desert vegetation response to groundwater table changes. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2702–2708. (in Chinese with English abstract) [赵文智, 刘鹂 (2006). 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展. *生态学报*, 26, 2702–2708.]
- Zhao X, Tan K, Fang JY (2011). NDVI-based interannual and seasonal variations of vegetation activity in Xinjiang during the period of 1982–2006. *Arid Zone Research*, 28, 10–16. (in Chinese with English abstract) [赵霞, 谭琨, 方精云 (2011). 1982–2006年新疆植被活动的年际变化及其季节差异. *干旱区研究*, 28, 10–16.]
- Zheng XJ, Li Y (2009). Effect of soil moisture sorption on soil moisture availability. *Arid Zone Research*, 26, 744–749. (in Chinese with English abstract) [郑新军, 李彦 (2009). 土壤吸附作用对土壤水分有效性的影响. *干旱区研究*, 26, 744–749.]
- Zhong HP, Liu H, Wang Y, Tuo Y, Geng LH, Yan ZJ (2002). Relationship between Ejina oasis and water resources in the lower Heihe River basin. *Advances in Water Science*, 13, 223–228. (in Chinese with English abstract) [钟华平, 刘恒, 王义, 托娅, 耿雷华, 颜志俊 (2002). 黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系. *水科学进展*, 13, 223–228.]
- Zhou H, Zheng XJ, Tang LS, Li Y (2013). Differences and similarities between water sources of *Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica* in the southeastern Junggar Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 665–673. (in Chinese with English abstract) [周海, 郑新军, 唐立松, 李彦 (2013). 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*, 37, 665–673.]
- Zhou PZ, Hou CX, Chen SM (1988). Some physiological and biochemical particularities of super-xerophytes *dungrunga Haloxylon ammodendron* to water stress (preliminary study). *Arid Zone Research*, (1), 1–8. (in Chinese with English abstract) [周培之, 侯彩霞, 陈世民 (1988). 超旱生小乔木梭梭对水分胁迫反应的某些生理生化特殊性(初报). *干旱区研究*, (1), 1–8.]
- Zhou YD, Chen SP, Song WM, Lu Q, Lin GH (2011). Water-use strategies of two desert plants along a precipitation gradient in northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 789–800. (in Chinese with English abstract) [周雅聘, 陈世莘, 宋维民, 卢琦, 林光辉 (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, 789–800.]

责任编辑: 罗天祥 责任编辑: 李 敏