

# 不同降水条件下科尔沁沙地小叶锦鸡儿和盐蒿的水分利用动态

陈定帅<sup>2,3\*</sup> 董正武<sup>1\*</sup> 高磊<sup>2</sup> 陈效民<sup>3</sup> 彭新华<sup>2</sup> 司炳成<sup>4</sup> 赵英<sup>1,4\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; <sup>2</sup>中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; <sup>3</sup>南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; <sup>4</sup>西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100

**摘要** 植物水分来源的判定是干旱半干旱区土壤-植物水分关系研究的重要方面, 有助于理解沙地植物对干旱环境的适应机制。该文研究了不同降水条件下科尔沁沙地典型灌木小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和盐蒿(*Artemisia halodendron*)的水分利用过程。试验采用增减雨装置模拟自然降水方法, 设置增雨(+50%)、对照和减雨(-50%) 3个处理, 利用稳定性同位素技术测量了两种植物木质部水、降水、0–120 cm不同土层土壤水的稳定氢同位素比率( $\delta D$ )和稳定氧同位素比率( $\delta^{18}O$ )值, 最后利用IsoSource模型计算了两种灌木对潜在水源的利用比例。结果表明: 1)增减雨处理主要影响表层(0–30 cm)土壤水分, 增雨处理显著提高了两种灌木地上和地下生物量, 且 $\delta^{18}O$ 值随土壤深度增加而降低; 而减雨处理 $\delta^{18}O$ 值随土壤深度增加而降低的趋势更加明显; 2)在增雨处理下, 盐蒿增加了对浅层0–40 cm土壤水的利用比例, 而小叶锦鸡儿对各土层水分的利用程度较为平均; 在减雨处理下, 由于表层土壤含水量较低, 两种植物均提高了对深层土壤水的利用比例, 其中盐蒿主要用水层次为60–80 cm, 而小叶锦鸡儿为60–120 cm; 3)就不同降水季节而言, 湿季(5–6月)由于降水迅速补给浅层土壤水分, 两种植物主要利用0–60 cm的土壤水; 旱季(9月)由于降水偏少, 小叶锦鸡儿对浅层水分利用急剧减少, 转而利用更深层次的土壤水分; 而盐蒿对各层次水分利用程度较为均匀。由此可见, 同小叶锦鸡儿相比, 盐蒿具有更强的抗旱能力及适应性。

**关键词** 小叶锦鸡儿; 盐蒿; 水分来源; 模拟降水

**引用格式:** 陈定帅, 董正武, 高磊, 陈效民, 彭新华, 司炳成, 赵英 (2017). 不同降水条件下科尔沁沙地小叶锦鸡儿和盐蒿的水分利用动态. 植物生态学报, 41, 1262–1272. doi: 10.17521/cjpe.2017.0219

## Water-use process of two desert shrubs along a precipitation gradient in Horqin Sandy Land

CHEN Ding-Shuai<sup>2,3\*</sup>, DONG Zheng-Wu<sup>1\*</sup>, GAO Lei<sup>2</sup>, CHEN Xiao-Min<sup>3</sup>, PENG Xin-Hua<sup>2</sup>, SI Bing-Cheng<sup>4</sup>, and ZHAO Ying<sup>1,4\*\*</sup>

<sup>1</sup>Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; <sup>3</sup>College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; and <sup>4</sup>Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

### Abstract

**Aims** The determination of the source of plant water is an important research on the plant-water relationship in arid and semiarid regions and helps to understand the adaptation strategy of desert species to the dry environment. Plant water use pattern affects plant community composition and ecosystem water budget. This study aims to investigate the water use patterns of *Caragana microphylla* and *Artemisia halodendron*, two typical shrub species, under altered rainfall conditions in Horqin Sandy Land.

**Methods** Water treatments include ambient rainfall (natural rainfall), 50% increase in rainfall (enhanced rainfall) and 50% decrease in rainfall (reduced rainfall) by artificially intercepting and redistributing natural rainfall. Stable hydrogen and oxygen isotope ratios ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) were measured for xylem water, rainfall, and soil water in different soil layers (0–120 cm depth). The possible ranges of potential water sources used by *C. microphylla* and *A. halodendron* were calculated using the IsoSource model.

**Important findings** 1) Alteration of ambient rainfall mainly affected the soil water condition in the shallow soil (0–30 cm). Increase in rainfall significantly increased the above- and below-ground biomass, and  $\delta^{18}O$  values of

收稿日期Received: 2017-08-16 接受日期Accepted: 2017-11-20

\* 并列第一作者Co-first author

\*\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: yzhaosoils@gmail.com)

soil water declined with soil depth. 2) Under the enhanced rainfall treatment, *A. halodendron* mainly used the soil water in the shallow soil (0–40 cm) and *C. microphylla* was able to extract water from multiple soil layers. Under the reduced rainfall treatment, both species increasingly relied on extracting water from deeper soil layers, 60–80 cm for *A. halodendron* and 60–120 cm for *C. microphylla*. 3) For the natural rainfall treatment, in the wet season, the upper soil water was recharged by rainfall, *C. microphylla* and *A. halodendron* extract the shallow soil water (0–60 cm). However, in the dry season, soil water content was dramatically reduced, and main water sources for *C. microphylla* shifted from topsoil to deeper soil, and *A. halodendron* can use multiple layers of soil water. In summary, *A. halodendron* is more capable of exploring deeper soil moisture under reduced rainfall in comparison with *C. microphylla*, and is likely to be more adaptive to this water-limiting desert environment.

**Key words** *Caragana microphylla*; *Artemisia halodendron*; water sources; simulated rainfall

**Citation:** Chen DS, Dong ZW, Gao L, Chen XM, Peng XH, Si BC, Zhao Y (2017). Water-use process of two desert shrubs along a precipitation gradient in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 1262–1272. doi: 10.17521/cjpe.2017.0219

在干旱半干旱区, 水是限制植物定居、生存和生长的关键因子(Duan *et al.*, 2008; 周海等, 2013; 刘凯等, 2015)。降水是沙地生态系统的主要水分来源, 年降水格局在塑造植物适应性方面起着重要作用(Schwinning & Ehleringer, 2001), 制约着沙地植被的形成和发展(Knapp *et al.*, 2001), 也影响着土壤-植被系统的演变方向和生态功能(李小雁, 2012)。由于沙漠地区降水少, 降水时间不确定, 加上蒸发量大, 表层土壤水分含量波动剧烈。为了维持生长, 植物必须依赖较稳定的水源, 如深层土壤水或地下水(张凯等, 2011; 郑肖然等, 2015)。已有研究发现, 在干旱半干旱区, 植物主要吸收降水补充的浅层土壤水或地下水补充的深层土壤水(Dodd *et al.*, 1998)。在不同的降水条件下, 植物的水分利用效率也不同, 植物可能同时利用多个水源, 或者季节性的转换水源(周雅聘等, 2011)。近年来随着全球气候变化加剧, 极端降水事件及降水量减少表现出波动上升的趋势, 大间隔单次降水的增加势必会导致干旱半干旱地区植物水分利用格局发生变化。因此, 研究降水梯度下区域植物水分利用策略极有必要。其中, 利用增减雨处理, 以“空间代替时间”的方法, 是旱地模拟植物响应未来气候变化的较好手段(赵文智等, 2002; 程徐冰等, 2011)。如果能同时利用水同位素技术, 则可能明晰旱区植物水分利用机制。

氢氧稳定同位素技术是定量研究植物水分利用来源、水分利用格局的较好方法。利用该技术手段, 国内学者对干旱半干旱区植物水分来源及不同水源对植物的贡献做了相关研究(赵良菊等, 2008; 余绍文等, 2012; 李亚飞等, 2017; 朱雅娟等, 2017)。小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)属豆科锦鸡儿属灌木, 盐蒿(*Artemisia halodendron*)属菊科蒿属灌木或半灌

木。这两种植物均为内蒙古草原的优势植物种, 主要分布于锡林河流域及科尔沁沙地, 在防风固沙、保持水土等方面起着极其重要的作用(曹成有等, 2004; 郑肖然等, 2015)。近年来, 小叶锦鸡儿和盐蒿群落在科尔沁沙地出现退化现象, 而降水和地下水的变化可能与两种植物退化存在密切关系。因此, 了解降水增减过程中小叶锦鸡儿和盐蒿对降水变化的响应机制对制定有效的植被管理对策具有重要意义。

科尔沁沙地位于内蒙古东部西辽河中下游, 是我国最大的沙地, 也是我国沙漠化最为严重的一个地区。在全球气候变化的影响下, 该地区年降水量呈减少趋势, 气候趋于干旱化(张腊梅等, 2014)。作为科尔沁沙地的主要优势种, 小叶锦鸡儿和盐蒿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的影响(熊小刚等, 2003; Li *et al.*, 2013)。本研究应用稳定性同位素技术分析模拟降水条件下小叶锦鸡儿和盐蒿水分利用动态以及变化特征, 研究结果对认识干旱半干旱区气候变化下植物的适应性, 以及对植被保护、恢复与重建具有参考价值, 为合理安排当地种植固沙植株的密度及空间分布提供指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地中南部内蒙古自治区通辽市奈曼旗境内(120.32°–121.52° E, 42.23°–43.53° N, 平均海拔约为360 m)。该区域属温带半干旱大陆性季风气候, 年平均气温6.5 °C, 最热月(7月)平均气温为23.5 °C, 全年≥10 °C的有效积温在3 000 °C以上, 无霜期约150天, 年降水量364.6 mm, 主要集中在6–8月, 年蒸发量1 972.8 mm, 年平均风速

doi: 10.17521/cjpe.2017.0219

$3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。地貌类型以沙丘和面积不等的平缓沙地及甸子地交错分布为特征, 土壤多为风沙土或沙质草甸土。研究区天然植物群落以中旱生植物为主, 其主要植物种有盐蒿、小叶锦鸡儿、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、长穗虫实(*Corispermum elongatum*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等。

## 1.2 样地布设

试验场地于2014年6月建于中国科学院奈曼沙漠化研究站周围围封的平缓固定沙地, 在样区内分别选择当地天然生长的生长良好、形态相近的10年生小叶锦鸡儿和盐蒿植株, 分别在两种植物生长较为均匀的样地布设增减雨装置各3个处理, 每个增减雨处理下有植株4–6株(其中增雨和减雨处理下各2–3株)。根据当地降水分布特征和增减雨装置的特性, 将增减雨量设计为降水单因素的重复对比实验, 即增雨、减雨和对照。以正常降水为对照, 增雨处理比对照增加降水50%, 减雨处理比对照减少降水50%。增减雨设置的样地为 $2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  (增雨和减雨样地分别为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ) (张腊梅等, 2014), 在增减雨装置交界处, 用防水布将增雨和减雨样地完全隔离, 并将增减雨样地交界处地下1 m深土体用防水布包裹。每套装置周围留出5 m的缓冲带, 以避免相互干扰。对增减雨装置边缘的地下部分1 m深土体用防水布包裹, 防水布高出地表10 cm, 防止其土壤水分受相邻样地地表径流和侧向水分的影响。本研究中所采用的增减雨装置是由支撑架截雨槽、集雨箱和增雨管组成(张腊梅等, 2014)。截雨槽由透明有机玻璃板热压成直角角槽, 对光照的影响小。减雨功能

通过截雨槽将自然降水的50%截留, 达到减雨样地降低50%的降水量, 同时这部分所截留的降水流入集雨箱内, 然后通过增雨管将截留的降水均匀引入前方增水样方内, 实现同步增雨50%的目的(张腊梅等, 2014)。

## 1.3 样品采集与分析

在样区分别选取4株生长良好、形态相近、具有代表性的小叶锦鸡儿、盐蒿植株。于2015年5月17日(生长前期)、6月23日(生长期)和9月2日(生长后期)分别采集增雨、减雨和对照处理的两种植物木质部样品, 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0–120 cm土层的土壤样品, 取样时间同植物的取样时间一致。每20 cm作为一个土层取土样(盐蒿由于根系长度关系土样只采到80 cm), 每层所取土样迅速装入样品瓶, 用封口膜密封后放入携带的冰盒, 带回实验室冷冻保存, 用于分析土壤水的稳定氢同位素比率( $\delta\text{D}$ )、稳定氧同位素比率( $\delta^{18}\text{O}$ )值; 同时采用时域反射仪(TDR, IMKO, Ettlingen, Germany)测定植株附近土壤含水量。降水样品来自奈曼站气象观测站, 每次降水后收集雨水, 密封于专用玻璃瓶, 然后用封口膜密封, 放置在 $-2^\circ\text{C}$ 冰箱冷藏以备分析使用。2015年降水总量为230.2 mm, 试验期(5–9月)降水量为183.4 mm, 占全年降水量的80% (图1)。降水主要集中在5–7月(155.2 mm), 而8–9月降水总量仅为28.2 mm, 样区地下水埋深为7.5 m。采用低温真空抽提法提取土壤

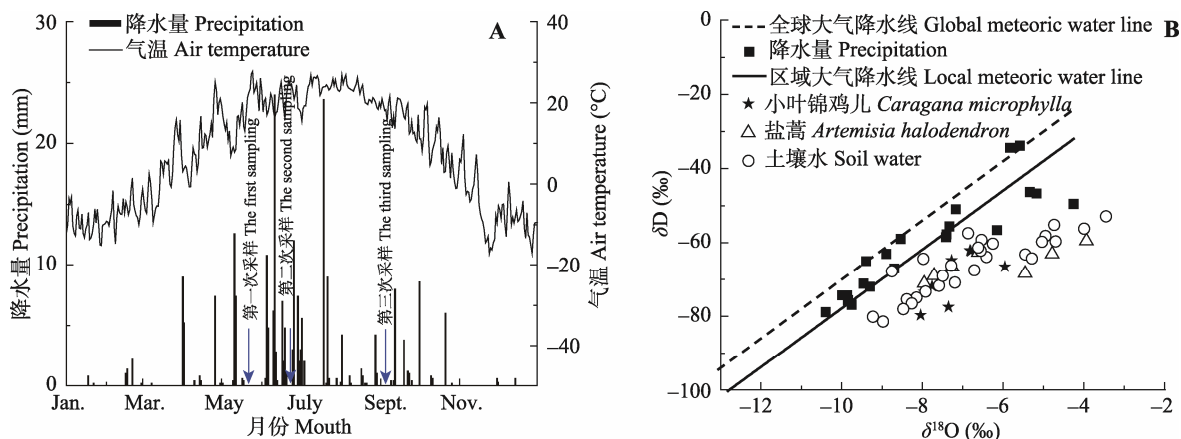


图1 研究区降水 and 气温(2015) (A) 及降水、土壤水和植物木质部水稳定氢、氧同位素比率( $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ) (B)。

Fig. 1 The precipitation and air temperature (2015) (A), and the stable hydrogen and oxygen isotope ratios ( $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) of precipitation, soil water and plant water (B) in the study area.

和植物样品中的水分, 将抽提的植物小枝木质部水(简称木质部水)和土壤水分别装入小玻璃瓶, 土壤水样品采用LGR液态水同位素分析仪(908-0008, Los Gatos Research, Mountain View, USA)测量, 为避免植物水样品中醇及其他挥发性有机物干扰同位素, 植物水样品采用质谱仪(Finnigan MAT-253, Thermo finnigan, Bremen, Germany)测定。

根系样品收集采用挖掘法, 从灌丛基部向外沿4个方向设置1 m × 1 m的样方, 垂直范围为最大根系深度, 从地表开始每20 cm一层, 对每层土壤过筛获取全部小叶锦鸡儿、盐蒿根系, 根系直径用游标卡尺测定, 按照输导根(直径大于1 mm)和吸收根(直径小于1 mm)分类放置, 清洗去除泥沙杂物及死根, 在80 °C下烘干至恒质量并称质量, 同时对样方内植物地上部分收割, 并烘干至恒质量并称质量。

#### 1.4 Iso-source模型

运用IsoSource模型计算小叶锦鸡儿和盐蒿对各水源的可能利用比例。该模型以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(Phillips & Gregg, 2003; Phillips *et al.*, 2005)。在初步判定两种植物的水分来

源后, 将两种植物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:

$$\delta_M = F_A\delta_A + F_B\delta_B + F_C\delta_C + F_D\delta_D \quad (1)$$

$$1 = F_A + F_B + F_C + F_D \quad (2)$$

式中:  $F_A$ 、 $F_B$ 、 $F_C$ 、 $F_D$ 为各水源所占比例,  $\delta_A$ 、 $\delta_B$ 、 $\delta_C$ 、 $\delta_D$ 为各水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,  $\delta_M$ 为小叶锦鸡儿和盐蒿木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。模型运行过程中自动为两种植物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, 如1%或2%, 各水源被利用比例的组合总计为100% (公式2), 利用迭代方法计算可能的比例组合。当各水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值加权值之和等于植物木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(公式1), 或小于某一可接受范围(质量平衡公差)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-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)。

#### 1.5 数据分析

利用SPSS 17.0统计软件进行单因素方差分析, 多重比较采用最小显著差异法。用Origin 8.0软件进行绘图。

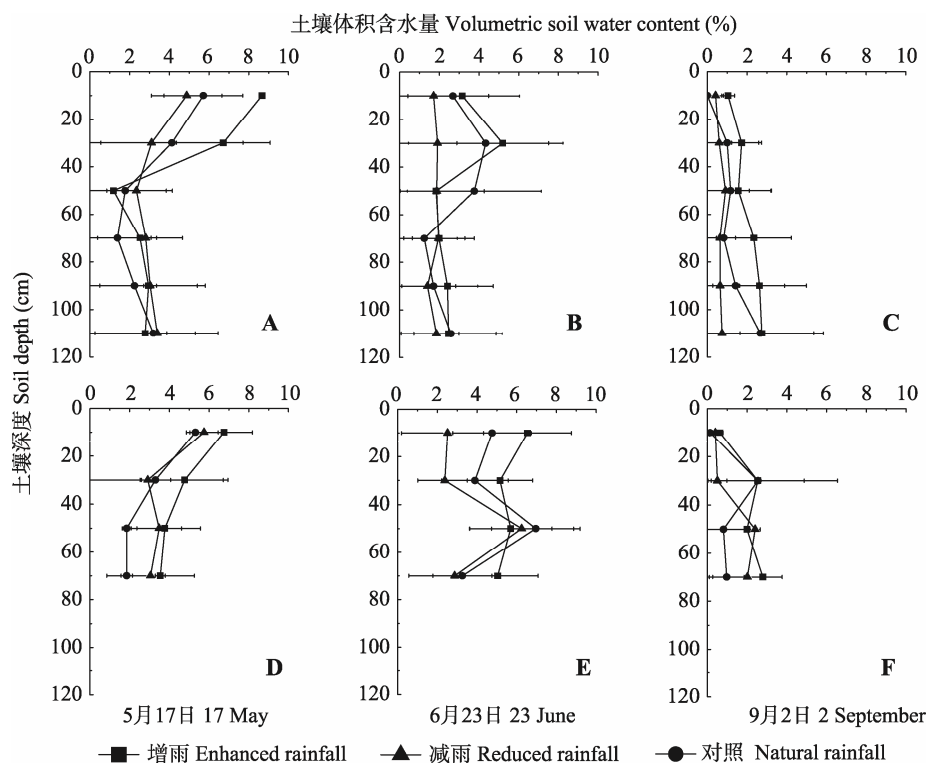


图2 不同降水处理下小叶锦鸡儿(A、B、C)和盐蒿(D、E、F)的土壤含水量(平均值±标准误差,  $n = 4$ )。

Fig. 2 Soil water content under *Caragana microphylla* (A, B, C) or *Artemisia halodendron* (D, E, F) as affected by enhanced or reduced rainfall (mean ± SE,  $n = 4$ ).

## 2 结果和分析

### 2.1 不同降水处理下土壤含水量的变化

不同降水处理下土壤剖面水分含量变化见图2。不同降水处理下,两种植物样地土壤含水量均较低,土壤含水量依次为:增雨处理>对照处理>减雨处理,这一差异在表层0–30 cm更加明显,随着土壤深度的增加差异性减小。湿季(5月17日和6月23日)土壤水分含量差异更加明显,而旱季(9月2日)土壤含水量差异不明显。5月17日和6月23日,小叶锦鸡儿样地0–40 cm土壤含水量在增雨处理下显著高于减雨处理( $p < 0.05$ ),而在40 cm以下土层含水量在各处理之间差异不显著( $p > 0.05$ ),9月2日,各处理下土壤含水量差异不显著( $p > 0.05$ )。5月17日和9月2日,盐蒿样地各处理下土壤含水量差异不显著( $p > 0.05$ ),6月23日增雨处理在0–40 cm土层呈现显著大于减雨处理( $p < 0.05$ )。9月2日盐蒿样地与小叶锦鸡儿样地土壤含水量均最低。

### 2.2 不同降水处理下植物生物量的变化

小叶锦鸡儿和盐蒿的生物量均随着降水量增加而增加,依次为:增雨处理>对照处理>减雨处理(图3)。两种植物的生物量在增雨处理下均显著高于减雨处理。与对照相比,增雨处理下小叶锦鸡儿的地上和地下生物量分别增加了38%和64%,而减雨处理下分别降低了28%和31%。盐蒿生物量的变化为减雨处理与对照的差异明显高于增雨处理与对照的

差异。小叶锦鸡儿地下生物量占总生物量的比例(52%–61%)显著高于盐蒿的比例(25%–49%)。小叶锦鸡儿根冠比随着降水量减少而降低,在增雨、对照和减雨处理下根冠比分别为1.57、1.31和1.10;盐蒿的根冠比在增雨和对照之间相近(0.34 vs 0.28),但显著低于减雨处理。

小叶锦鸡儿与盐蒿的输导根生物量显著大于吸收根生物量,且增减雨处理对输导根生物量的影响大于对吸收根生物量的影响(图4)。两种植物输导根生物量随土壤深度增加而减少,不同处理对输导根系生物量的影响主要集中于0–60 cm土层,依次为增雨处理>对照处理>减雨处理。小叶锦鸡儿吸收根随土壤深度增加而减少,且主要分布在0–60 cm土层,占总吸收根的75%;盐蒿的吸收根在各土层之间分布较为均匀。

### 2.3 不同降水处理下土壤水及植物水同位素的变化

对降水中 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 值进行分析,通过回归分析得出该区域大气降水线方程(LMWL,  $\delta D_{LMWL} = 6.36\delta^{18}O_{LMWL} - 10.126$ ,  $p < 0.001$ ),与全球大气降水线方程(GMWL,  $\delta D_{GMWL} = 8\delta^{18}O + 10$ )相比,斜率和截距明显偏小,且小叶锦鸡儿木质部和盐蒿木质部水、雨水和土壤水氢氧稳定同位素值都位于全球大气降水线右侧,表明在该区域的降水过程中氢氧稳定同位素受到了二次蒸发的影响(图1)。

小叶锦鸡儿木质部水和土壤水 $\delta^{18}O$ 值的变化趋势见图5和图6。5月17日增雨与对照处理下土壤水

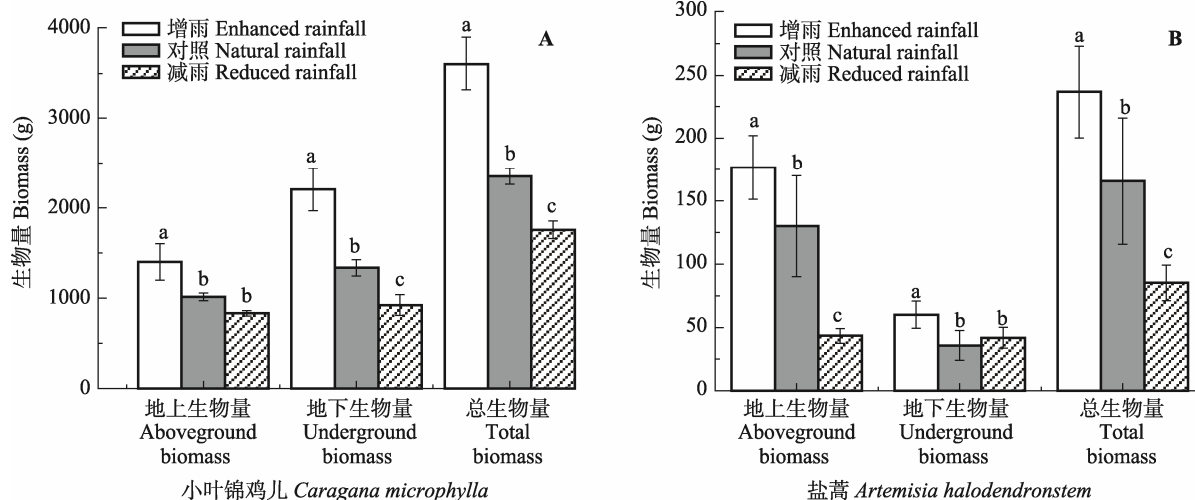


图3 不同降水处理下小叶锦鸡儿(A)和盐蒿(B)的地上和地下生物量(平均值±标准误差,  $n = 4$ )。不同小写字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 3 The aboveground and underground biomass of *Caragana microphylla* (A) and *Artemisia halodendron* (B) as affected by enhanced or reduced precipitation (mean  $\pm$  SE,  $n = 4$ ). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $p < 0.05$ ).



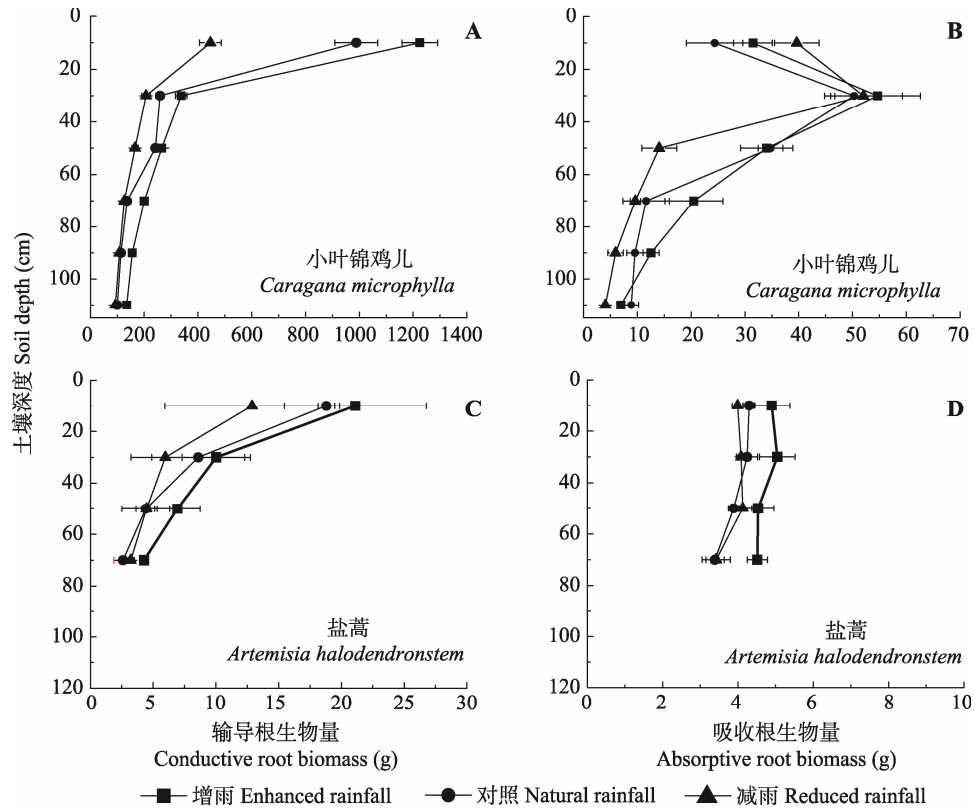


图4 小叶锦鸡儿(A、B)和盐蒿(C、D)吸收根与输导根的垂直分布特征(平均值±标准误差,  $n = 4$ )。

Fig. 4 The distribution of absorptive-conductive root biomass for *Caragana microphylla* (A, B) and *Artemisia halodendron* (C, D) as affected by enhanced or reduced precipitation (mean  $\pm$  SE,  $n = 4$ ).

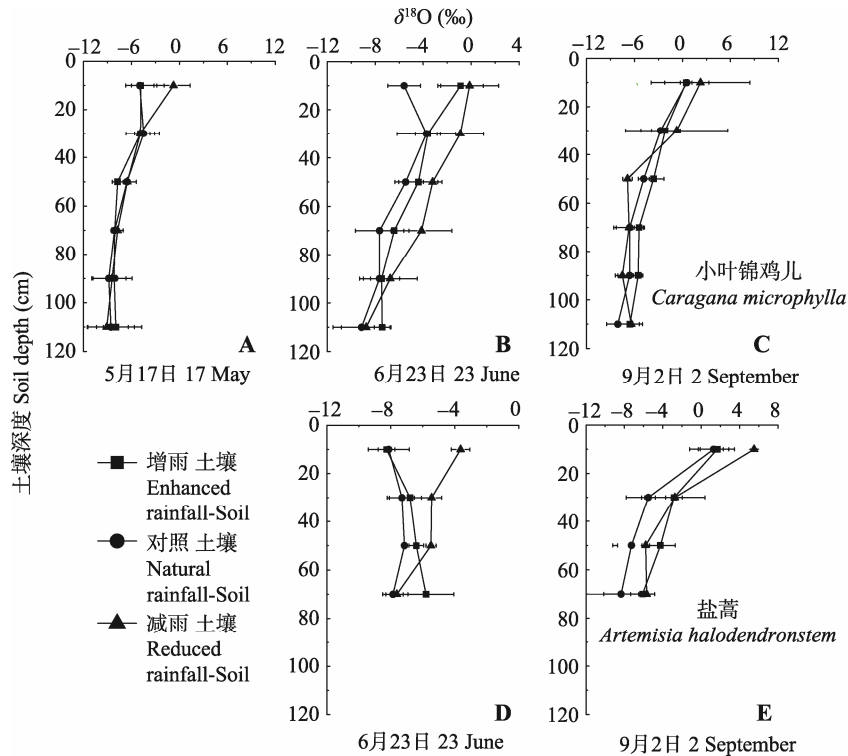


图5 不同降水处理下土壤水氧稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )值(平均值±标准误差,  $n = 4$ )。A、B、C为不同月份小叶锦鸡儿土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, D、E为不同月份盐蒿土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

Fig. 5 Oxygen stable isotope ratio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) of soil water as affected by enhanced or reduced precipitation (mean  $\pm$  SE,  $n = 4$ ). A, B and C show the  $\delta^{18}\text{O}$  values of *Caragana microphylla* in different months, D and E show the  $\delta^{18}\text{O}$  values of *Artemisia halodendron* in different months.

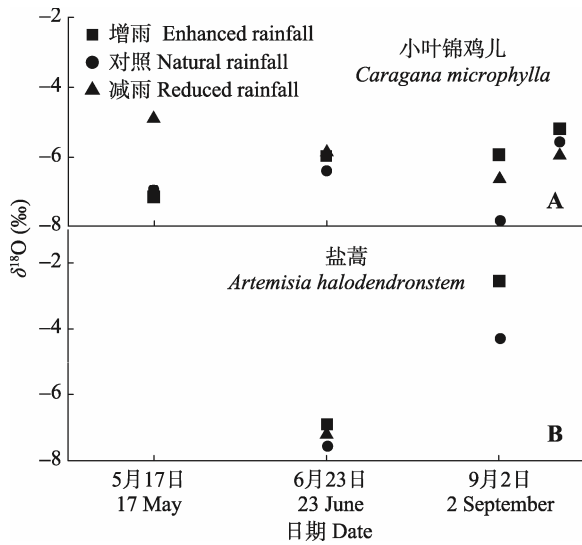


图6 不同降水处理下小叶锦鸡儿(A)和盐蒿(B)木质部水氧稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )值(平均值 $\pm$ 标准误差,  $n = 4$ )。  
Fig. 6 The xylem water  $\delta^{18}\text{O}$  values of *Caragana microphylla* (A) and *Artemisia halodendron* (B) as affected by enhanced or reduced precipitation (mean  $\pm$  SE,  $n = 4$ ).

$\delta^{18}\text{O}$ 值差异不显著( $p > 0.05$ ), 减雨处理下 $\delta^{18}\text{O}$ 值在0–20 cm土层高于增雨和对照处理, 也高于其他土层; 小叶锦鸡儿木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现为: 增雨(–7.18‰) <对照(–6.95‰) <减雨(–4.87‰); 6月23日由于降水增多和气温升高, 蒸散作用加剧, 不同深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在各处理之间差异显著( $p < 0.05$ ): 减雨处理>增雨处理>对照处理, 但各处理下小叶锦鸡儿木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异不明显(–6.39‰至–5.84‰); 经过了夏天干旱高温, 9月2日各处理下浅

层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值富集明显, 甚至达到正值, 而在60 cm以下土层 $\delta^{18}\text{O}$ 值保持相对稳定。

由于5月17日的样品采集量不够, 盐蒿样地只收集了后两次的数据(图5, 图6)。6月23日受降水影响, 盐蒿样地在增雨与对照处理下土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着土层深度增加呈增加趋势, 而减雨处理下则相反, 各处理下木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异不明显(–6.89‰至–7.53‰); 9月2日, 由于经过干旱高温的夏季, 土壤水分蒸发强烈, 表层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 显著上升, 同时木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著升高(–4.29‰至–2.54‰), 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着土层增加而减小, 且这一趋势在减雨处理下表现更为明显。

2.4 不同降水处理下植物对各水源的利用比例

不同降水处理下小叶锦鸡儿和盐蒿对土壤水分的利用比例见表1。5月小叶锦鸡儿在增雨和对照处理下水源贡献率相似, 且较均匀分布在整个土层, 而在减雨处理下主要吸收0–40 cm土壤水, 水分利用比例达到53.2%。6月各处理之间差异明显, 增雨处理下小叶锦鸡儿主要利用20 cm以下的土壤水; 而对照处理下主要吸收0–60 cm土壤水, 水分利用比例达65.1%; 而减雨处理下主要利用60–120 cm层土壤水, 水分利用比例达70.4%。9月各处理下主要吸收深层土壤水, 增雨和对照处理下主要利用100–120 cm层土壤水, 利用比例为49.6%–67.2%, 减雨处理下主要利用40–120 cm层土壤水, 利用率达94.3%。

表1 不同降水处理下两种灌木对各潜在水源的利用比例(%) (平均值(最小值–最大值))  
Table 1 Contributions of soil water at different depths to two desert shrubs as affected by enhanced or reduced precipitation (%) (mean (minimum – maximum))

种 Species	土壤深度 Soil depth (cm)	5月17日 17 May			6月23日 23 June			9月2日 2 September		
		增雨 Enhanced rainfall	对照 Natural rainfall	减雨 Reduced rainfall	增雨 Enhanced rainfall	对照 Natural rainfall	减雨 Reduced rainfall	增雨 Enhanced rainfall	对照 Natural rainfall	减雨 Decreased rainfall
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	0–20	12.5 (0–29)	15.8 (0–48)	32.9 (0–50)	10.1 (0–30)	21.8 (0–88)	8.1 (0–38)	1.5 (0–8)	2.6 (0–14)	2.3 (0–10)
	20–40	12.5 (0–29)	14.6 (0–43)	20.3 (0–100)	15.1 (0–52)	21.2 (0–57)	8.9 (0–42)	2.6 (0–14)	4.5 (0–23)	3.5 (0–15)
	40–60	19.4 (0–82)	19.8 (0–82)	14.4 (0–71)	17.4 (0–65)	22.1 (0–84)	12.6 (0–59)	4.2 (0–20)	7.8 (0–38)	24.1 (0–95)
	60–80	18.5 (0–72)	17.6 (0–68)	11.8 (0–58)	20.1 (0–83)	12.8 (0–58)	15.1 (0–72)	11.7 (0–54)	17.6 (0–84)	22.5 (0–98)
	80–100	18.3 (0–71)	15.8 (0–57)	10.7 (0–54)	18.6 (0–69)	12.8 (0–58)	26.0 (0–80)	12.8 (0–59)	17.8 (0–85)	28 (0–89)
	100–120	18.8 (0–76)	16.4 (0–61)	9.8 (0–49)	18.7 (0–69)	9.3 (0–42)	29.3 (0–61)	67.2 (41–91)	49.6 (15–85)	19.7 (0–92)
盐蒿 <i>Artemisia halodendron</i>	0–20	–	–	–	25.7 (0–44)	17.4 (0–40)	3.6 (0–11)	26.9 (7–49)	31.5 (18–42)	11.4 (0–20)
	20–40	–	–	–	31.3 (0–94)	31.4 (0–73)	6.7 (0–20)	31.4 (0–92)	27.6 (0–81)	31.2 (0–74)
	40–60	–	–	–	24.6 (0–74)	28.3 (0–61)	7.3 (0–21)	23.8 (0–70)	21.5 (0–63)	28.7 (0–20)
	60–80	–	–	–	18.4 (0–55)	22.9 (0–55)	82.4 (79–89)	17.9 (0–53)	19.4 (0–58)	28.7 (0–20)

–, 没有采集到数据。  
–, there is no data.

6月盐蒿在增雨处理下主要利用0–60 cm土壤水(81.6%), 而对照处理下主要利用20–80 cm层土壤水(82.6%), 减雨处理下主要利用60–80 cm土壤水, 利用比例高达82.4%。9月各处理下水分利用差异不明显, 增雨处理下主要利用0–60 cm层土壤水, 贡献率为82.1%, 对照处理下对各土层的利用比例较为均匀, 减雨处理下主要利用20–80 cm土壤水, 贡献率高达88.6%。

### 3 讨论

#### 3.1 降水变化对植物水分利用的影响

植物所能利用的水分主要来自降水、土壤水和地下水(Ehleringer & Dawson, 1992; 赵文智等, 2002), 而土壤水和地下水最初也来自降水(Dawson *et al.*, 2002)。本研究中观测到的大气降水有明显的季节差异, 春夏季降水偏多, 而秋冬季降水偏少。降水的变化直接影响到土壤水分的分布格局, 由于研究区域地下水埋藏较深, 土壤含水量低, 侧渗和地下水补给作用不明显(Xu *et al.*, 2011; 刘凯等, 2015), 故土壤水主要受降水与蒸散的影响。降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化引起浅层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节性差异(余绍文等, 2012; 戴岳等, 2014), 本研究中湿季(5–6月)浅层土壤水受到降水的补给,  $\delta^{18}\text{O}$ 值偏小, 旱季(9月)浅层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏大, 呈现富集现象(图2, 图5)。这一变化过程与Saxena (1984)研究发现的季节降水分布与浅层土壤水稳定同位素值有极高的变异性相一致。不同土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的差异也进一步证实了土壤含水量受不同降水水源的影响(图1, 图5), 土壤水的稳定同位素同时受蒸发的影响, 且随土壤深度的增加, 蒸发效应减小(Barnes & Allison, 1998)。本研究中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并趋于稳定(图5)。

在干旱、半干旱条件下, 植物表层土壤中的根主要吸收由降水补充的土壤水, 而深根主要吸收由冬春季降水或地下水补充的土壤水(Williams & Ehleringer, 2000; Chimner & Cooper, 2004)。由于表层土壤中的根在干旱情况下可能处于不活动状态(Flanagan & Ehleringer, 1992), 因此在降水较少时, 植物只能依赖深根从土壤中吸收水分(Ehleringer & Dawson, 1992)。已有研究认为小叶锦鸡儿和盐蒿可利用降水形成的浅层土壤水维持生存, 有效的根系形态结构调节是其适应降水变化的主要机制(刘士

刚等, 2003; 李凯锋等, 2012)。在不同的降水条件下, 小叶锦鸡儿和盐蒿的主要水分来源存在差异(表1)。两种植物有不同的根系分布特征, 小叶锦鸡儿吸收根主要分布范围为0–120 cm, 其中75%分布在0–60 cm土层; 盐蒿吸收根分布范围为0–80 cm, 并且各层分布相对均匀(图4)。两种植物的大量根系分布在浅层土壤中, 小叶锦鸡儿的根系生物量主要分布在0–60 cm, 盐蒿主要分布在0–40 cm, 而小叶锦鸡儿和盐蒿的主根分别能够达到120 cm和80 cm深, 可吸收较为深层的土壤水(图4)。在降水较多时, 由雨水补充的表层土壤水增多, 植物增加对浅层土壤水的利用(Lin *et al.*, 1996; Williams & Ehleringer, 2000; Duan *et al.*, 2008)。湿季(5–6月)在自然降水下, 降水补充了浅层土壤水, 小叶锦鸡儿和盐蒿分别约60%和75%的水分来自于0–60 cm的土壤水。5月在增雨处理下, 小叶锦鸡儿对各层的水分利用较为均匀, 说明降水充沛的条件下较高的土壤含水量使增雨处理对小叶锦鸡儿水分利用无明显影响; 而在减雨处理下, 小叶锦鸡儿约50%的水分来源于0–40 cm土壤水, 这可能是由于降水量的减少使水分不能快速地下渗到深层, 从而有利于植物对表层水分的吸收。6月随着温度的升高, 蒸发的增强, 增雨处理小叶锦鸡儿约90%的水分来源于20 cm以下土壤, 盐蒿主要利用0–60 cm土壤水(约占80%), 并且分布较为均匀, 而在减雨处理下小叶锦鸡儿约70%的水分来源于60–120 cm土壤水, 盐蒿主要利用60–80 cm土壤水(约占82%)(表1), 说明减水显著降低了土壤含水量, 浅层土壤水不能满足两种植物的需求, 它们寻求深层土壤水来维持生命活动, 从而提高了植物对深层土壤水的利用效率(Groisman *et al.*, 1999; 马成仓等, 2004)。到了旱季(9月), 降水偏少, 表层土壤含水量极少(图2), 在对照和增雨处理下, 小叶锦鸡儿对浅层土壤水的利用急剧减少, 转而利用深层土壤水; 而盐蒿对各土层的水分利用比例较为均匀, 这也进一步说明了盐蒿具有较强的抗旱能力, 并且对干旱半干旱环境具有较强的适应性; 而在减雨处理下, 小叶锦鸡儿和盐蒿均主要利用40 cm以下土壤水, 且分布较为均匀(表1); 这说明在极其干旱的条件下, 这两种植物为了适应干旱环境, 均向多层土壤摄取水分维持其生命活动。

#### 3.2 植物用水策略对降水变化的适应

植物用水主要取决于当地年降水量、降水季节



性、地下水位的高低以及土壤水的可获得性(杜雪莲和王世杰, 2012)。不同物种间的水分竞争也会影响植物的水分利用来源(Schwinning *et al.*, 2005), 在灌草共生状态下, 由于水分竞争和协同用水机制, 草本植物由于根系深度限制趋向于利用浅层土壤水分。在本研究样地, 有猪毛菜等草本植物分布, 但是减雨处理由于降水补给减少, 浅层土壤含水量较低, 草本植物在生长期枯死, 使小叶锦鸡儿在水分利用中缺少竞争对手, 优先使用浅层土壤水; 而增雨和对照处理小叶锦鸡儿有大量的降水补给, 土壤含水量相对于减雨处理均较高, 小叶锦鸡儿能均匀地利用各土层的水分, 满足其生长用水。在干旱气候条件下表层土壤中的根可能处于休眠状态, 植物只能依赖深根从土壤中吸收水分(Flanagan & Ehleringer, 1992)。在生长中期, 由于6月水分蒸发效果显著, 减雨处理土壤含水量较低, 并且得不到降水的有效补充, 小叶锦鸡儿和盐蒿主要吸收深层土壤水分。在生长后期, 由于9月蒸发消耗了较多的土壤水分且无降水补给, 土壤水分含量持续下降, 整个土层含水量极低, 小叶锦鸡儿在各处理下浅层根系处于休眠状态, 吸水深度分布在深层; 而盐蒿出现局部枝条萎蔫枯死等缺水症状, 尽可能利用各土层中的水分来维持生存, 吸水深度分布在整个土层。

植物根系的生长状况及其在土壤剖面中的分布格局是影响其吸收水分和养分的重要因素, 根系生长数量及其土壤中的分布格局很大程度上受土壤水分状况调控(牛海等, 2008)。经过一个生长季的降水变化处理, 增雨处理提高了小叶锦鸡儿和盐蒿的生物量。在湿季, 增雨处理促进了浅层土壤水分对植物用水的供应, 而在旱季, 增雨处理提高了深层土壤水分对植物用水的贡献。可见, 增雨处理通过提高表层土壤水分, 促进根系生长, 从而也提高了该土层水分对植物用水的贡献; 而减雨处理导致浅层土壤水显著下降, 提高了深层土壤水对植物用水的贡献。

全球气候变化对整个生态过程存在一定的影响(Vitousek, 1994)。除了温度和空气中CO<sub>2</sub>浓度的增加, 降水通过影响土壤水分间接调节植物生长(Dunne *et al.*, 2003; Meehl *et al.*, 2005)。模拟降水条件下, 夏季降水的增加使小叶锦鸡儿和盐蒿利用水分的土层范围增加, 更利于其在干旱半干旱地区生长。但若出现夏季降水量减少和周期性的干旱, 小叶锦鸡儿和

盐蒿对不同层土壤水分均有较强的依赖性。一旦有限土层范围内的水分不能满足小叶锦鸡儿和盐蒿正常生长的水分需要, 可能出现枝条枯死等症状, 甚至死亡灭绝。与此同时, 浅根植物由于水分竞争, 物种丰富度和产量也随之下降, 植物对水分利用效率的降低, 会进一步加剧干旱带来的影响(Groisman *et al.*, 1999)。

## 4 结论

在不同降水条件下, 降水量的增加提高了浅层土壤含水量, 也相应地提高了浅层土壤水对植物用水的贡献, 盐蒿增加了对0–40 cm土壤水的利用比例, 而小叶锦鸡儿对各土层水分的利用率较为均匀, 表明降水能够补充盐蒿主要利用的土壤水。在减雨处理下, 表层土壤含水量降低, 小叶锦鸡儿和盐蒿均表现出对深层土壤水的利用, 小叶锦鸡儿主要利用60–120 cm土壤水, 盐蒿主要利用60–80 cm土壤水; 从而提高了植物对深层土壤水的利用比例。不同降水处理对小叶锦鸡儿的影响大于盐蒿。而降水量增加的作用在雨季更加明显, 在旱季则不明显。雨季降水较多补充了浅层土壤水, 小叶锦鸡儿和盐蒿主要利用0–60 cm的土壤水。旱季降水偏少, 小叶锦鸡儿对浅层土壤水的利用急剧减少, 转而主要利用更深层次的土壤水。而盐蒿对各层次的水分利用比例较为均匀, 这也进一步证实了盐蒿具有较强的抗旱能力, 并且对于干旱半干旱环境具有较强的适应性。

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB429902)、国家“千人计划”新疆项目(Y472241001)和国家自然科学基金(41630860和41371234)。

**致谢** 该研究工作得到中国科学院奈曼沙漠化试验研究站的支持, 在此表示感谢!

## 参考文献

- Barnes CJ, Allison GB (1998). Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Journal of Hydrology*, 100, 143–176.
- Cao CY, Jiang DM, Luo YM, Kou ZW (2004). Stability of *Caragana microphylla* plantation for wind protection and sand fixation. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1178–1186. (in Chinese with English abstract) [曹成有, 蒋德明, 骆永明, 寇振武 (2004). 小叶锦鸡儿防风固沙林稳定性研究. 生

- 态学报, 24, 1178–1186.]
- Cheng XB, Wu J, Han SJ, Zhou YM, Wang XX (2011). Effects of decreased rainfall on *Quercus mongolica* leaf eco-physiological characteristics. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 1908–1914. (in Chinese with English abstract) [程徐冰, 吴军, 韩士杰, 周玉梅, 王秀秀 (2011). 减少降水对长白山蒙古栎叶片生理生态特性的影响. 生态学报, 30, 1908–1914.]
- 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.
- Dai Y, Zheng XJ, Tang LS, Li Y (2014). Dynamics of water usage in *Haloxylon ammodendron* in the southern edge of the Gurbantünggüt Desert. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 1214–1225. (in Chinese with English abstract) [戴岳, 郑新军, 唐立松, 李彦 (2014). 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态. 植物生态学报, 38, 1214–1225.]
- Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH (2002). Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 507–559.
- Dodd MB, Lauenroth WK, Welker JM (1998). Differential water resource use by herbaceous and woody plant life forms in a shortgrass steppe community. *Oecologia*, 117, 504–512.
- Du XL, Wang SJ (2011). Recent advances of stable hydrogen and oxygen isotopic techniques in plant water use strategy. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(22), 5–10. (in Chinese with English abstract) [杜雪莲, 王世杰 (2011). 稳定性氢氧同位素在植物用水策略中的研究进展. 中国农学通报, 27(22), 5–10.]
- Duan DY, Ouyang H, Song MH (2008). Water sources of dominant species in three alpine ecosystems on the Tibetan Plateau, China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50, 257–264.
- Dunne JA, Harte J, Taylor KJ (2003). Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: Integrating experimental and gradient methods. *Ecological Monographs*, 73, 69–86.
- Ehleringer JR, Dawson TE (1992). Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 15, 1073–1082.
- Flanagan LB, Ehleringer JR (1992). Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell & Environment*, 15, 831–836.
- Groisman PY, Karl TR, Easterling DR (1999). Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 42, 243–283.
- Knapp AK, Briggs JM, Koelliker JK (2001). Frequency and extent of water limitation to primary production in a mesic temperate grassland. *Ecosystems*, 4, 19–28.
- Li KF, Luo YY, Zhang HL, She HY (2012). The relations between root distribution of *Artemisia halodendron* and soil water in Horqin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(8), 167–171. (in Chinese with English abstract) [李凯锋, 罗于洋, 张海龙, 折红燕 (2012). 科尔沁差巴嘎蒿根系分布规律与土壤水分关系的研究. 干旱区资源与环境, 26(8), 167–171.]
- Li XY (2012). Coupling, respond and adaptation of soil-plant water in arid areas in arid area. *Science China: Earth Science*, 41, 1721–1730. (in Chinese) [李小雁 (2012). 干旱地区土壤-植被-水文耦合, 响应与适应机制. 中国科学: 地球科学, 41, 1721–1730.]
- Li XY, Zhang SY, Peng HY (2013). Soil water and temperature dynamics in shrub-encroached grasslands and climatic implications: Results from Inner Mongolia steppe ecosystem of north China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172, 20–30.
- Li YF, Yu JJ, Lu K, Wang P, Zhang YC (2017). Water sources of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in Ejina Delta, the lower reaches of the Heihe River, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 519–528. (in Chinese with English abstract) [李亚飞, 于静洁, 陆凯, 王平, 张一驰 (2017). 额济纳三角洲胡杨和多枝柽柳水分来源解析. 植物生态学报, 41, 519–528.]
- 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 K, Gao L, Peng XH, Zhang ZB (2015). Spatio-temporal variability of soil moisture in Horqin sandy land. *Soils*, 47, 765–772. (in Chinese with English abstract) [刘凯, 高磊, 彭新华, 张中彬 (2015). 半干旱区科尔沁沙地土壤水分时空特征研究. 土壤, 47, 765–772.]
- Liu SG, Piao SJ, An MZ, Liu F (2003). Distribution dynamics of *Artemisia halodendron* absorbent roots in different kinds of sandy land. *Acta Phytoecologica Sinica*, 27, 684–689. (in Chinese with English abstract) [刘士刚, 朴顺姬, 安卯柱, 刘芳 (2003). 不同类型沙地上差不嘎蒿细根的分布状态. 植物生态学报, 27, 684–689.]
- Ma CC, Gao YB, Jiang FQ, Wang JL, Guo HY, Wu JB, Su D (2004). The comparison studies of ecological and water regulation characteristics of *Caragana microphylla* and *Caragana stenophylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1442–1451. (in Chinese with English abstract) [马成仓, 高玉葆, 蒋福全, 王金龙, 郭宏宇, 吴建波, 苏丹 (2004). 小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿的生态和水分调节特性比较研究. 生态学报, 24, 1442–1451.]
- Meehl GA, Arblaster JM, Tebaldi C (2005). Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. *Geophysical Research Letters*, 32, 109–127.
- Niu H, Li HP, Zhao ML, Han X, Dong XH (2008). Relationship

- between soil water content and vertical distribution of root system under different ground water gradients in Maowusu Sandy Land. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 22, 157–163. (in Chinese with English abstract) [牛海, 李和平, 赵萌莉, 韩雄, 董晓红 (2008). 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究. *干旱区资源与环境*, 22, 157–163.]
- 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.
- Saxena RK (1984). Seasonal variations of oxygen-18 in soil moisture and estimation of recharge in esker and moraine formations. *Nordic Hydrology*, 15, 235–242.
- Schwinning S, Ehleringer JR (2001). Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems. *Journal of Ecology*, 89, 464–480.
- 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.
- Vitousek PM (1994). Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology*, 75, 1862–1876.
- Williams DG, Ehleringer JR (2000). Intra and interspecific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands. *Ecological Monographs*, 70, 517–537.
- Xiong XG, Han XG, Bai YF, Pan QM (2003). Increased distribution of *Caragana microphylla* in rangelands and its causes and consequences in Xilin River Basin. *Acta Prataculturae Sinica*, 12(3), 57–62. (in Chinese with English abstract) [熊小刚, 韩兴国, 白永飞, 潘庆民 (2003). 锡林河流域草原小叶锦鸡儿分布增加的趋势、原因和结局. *草业学报*, 12(3), 57–62.]
- Xu Q, Li H, Chen J (2011). Water use patterns of three species in subalpine forest, southwest China: The deuterium isotope approach. *Ecohydrology*, 4, 236–244.
- Yu SW, Sun ZY, Zhou AG, Zhang X, Duan LJ (2012). Determination of water sources of Gobi plants by  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  stable isotopes in middle reaches of the Heihe River. *Journal of Desert Research*, 32, 717–723. (in Chinese with English abstract) [余绍文, 孙自永, 周爱国, 张溪, 段丽军 (2012). 用 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 同位素确定黑河中游戈壁地区植物水分来源. *中国沙漠*, 32, 717–723.]
- Zhang K, Feng Q, Lü YQ, Zhang B, Si JH (2011). Study on spatial heterogeneity of soil water contents in oasis-desert belt of Minqin. *Journal of Desert Research*, 31, 1149–1155. (in Chinese with English abstract) [张凯, 冯起, 吕永清, 张勃, 司建华 (2011). 民勤绿洲荒漠带土壤水分的空间分异研究. *中国沙漠*, 31, 1149–1155.]
- Zhang LM, Liu XP, Zhao XY, Zhang TH, Yue XF (2014). Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 2737–2745. (in Chinese with English abstract) [张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 张铜会, 岳祥飞 (2014). 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应. *生态学报*, 34, 2737–2745.]
- Zhao LJ, Xiao HL, Cheng GD (2008). A preliminary study of water sources of riparian plants in the lower reaches of the Heihe Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 29, 709–718. (in Chinese with English abstract) [赵良菊, 肖洪浪, 程国栋 (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.]
- Zhao WZ, Liu ZM, Chang XL (2002). Skewness and inequality of height distribution of young *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands introduced on sandy soil with lower limited precipitation for tree survival and normal growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 6–10. (in Chinese with English abstract) [赵文智, 刘志民, 常学礼 (2002). 降水量下限引种区沙地樟子松幼林种群树高分布偏斜度和不整齐性. *应用生态学报*, 13, 6–10.]
- Zheng XR, Zhao GQ, Li XY, Li L, Wu HW, Zhang SY, Zhang ZH (2015). Application of stable hydrogen isotope in study of water sources for *Caragana microphylla* bush land in Nei Mongol. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 184–196. (in Chinese with English abstract) [郑肖然, 赵国琴, 李小雁, 李柳, 吴华武, 张思毅, 张志华 (2015). 氢同位素在内蒙古小叶锦鸡儿灌丛水分来源研究中的应用. *植物生态学报*, 39, 184–196.]
- 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 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, 陈世苹, 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.]
- Zhu YJ, Zhao XB, Liu YS, Li Y, Fan WX (2017). Water use process of *Salix psammophila* and *Salix cheilophila* in Gonghe Basin, Qinghai Province. *Journal of Desert Research*, 37, 281–287. (in Chinese with English abstract) [朱雅娟, 赵雪彬, 刘艳书, 李蕴, 范文秀 (2017). 青海共和盆地沙柳(*Salix psammophila*)和乌柳(*Salix cheilophila*)的水分利用过程. *中国沙漠*, 37, 281–287.]

责任编辑: 李彦 责任编辑: 李敏



扫码向作者提问