植物生态学报 2015, **39** (2): 184–196 doi: 10.17521/cjpe.2015.0018
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

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

郑肖然[1,2] 赵国琴[2] 李小雁[1,2*] 李 柳[2] 吴华武[2] 张思毅[2] 张志华[2]

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

摘 要 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)是我国内蒙古草原广泛分布的优势灌木, 目前国内外有关小叶锦鸡儿水分利用来源的定量研究较少。该文运用氢稳定同位素法, 分析了内蒙古小叶锦鸡儿木质部水和潜在水源(夏季降雨、冬季降雪和土壤水)的氢稳定同位素比率(δD)的季节变化, 发现小叶锦鸡儿在遮雨处理和自然状态下δD季节变化差异不明显, 分别为–101.36‰ ± 13.02‰和–101.18‰ ± 12.71‰。在遮雨处理条件下, 小叶锦鸡儿主要利用0–20 cm土壤层水分, 占其所利用水分的73.30% ± 16.14%; 自然状态下, 小叶锦鸡儿对0–20、20–60和60–100 cm不同土壤层土壤的水分利用较为均衡, 分别为34.66% ± 7.83%、32.44% ± 7.42%和32.90% ± 4.14%。该结果表明不同生境下灌木与草本的水分竞争可能是小叶锦鸡儿对不同土层水分利用差异的原因。结合两源模型分析了降雨对各土壤层的贡献率, 并用IsoSource多源混合模型分析了各土壤层对小叶锦鸡儿用水的贡献率, 发现降雨对小叶锦鸡儿的贡献率为42.65%–63.92%。该结果反映了小叶锦鸡儿对夏季降雨和冬季融雪的利用情况。

关键词 用水来源, 氘同位素, 小叶锦鸡儿, 植物水分

引用格式: 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. doi: 10.17521/cjpe.2015.0018

Application of stable hydrogen isotope in study of water sources for *Caragana microphylla* bushland in Nei Mongol

ZHENG Xiao-Ran[1,2], ZHAO Guo-Qin[2], LI Xiao-Yan[1,2*], LI Liu[2], WU Hua-Wu[2], ZHANG Si-Yi[2], and ZHANG Zhi-Hua[2]

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

Abstract

Aims *Caragana microphylla* is a dominant shrub widely distributed in the grasslands of Nei Mongol. Its water utilization pattern has an important effect on local plant community composition. However, the water source for *C. microphylla* remains poorly quantified, which is vital in understanding the adaptation of this specie to arid environment. This study aims to investigate the dynamics of water use in *C. microphylla* and its response to soil water fluctuations resulting from precipitation pattern including summer rains and winter snow.

Methods Seasonal variations of hydrogen stable isotope ratios (δD) in the xylem of *C. microphylla* and potential sources of water (summer rains, winter snow and soil water) were analyzed by LGR hydrogen stable isotope tracer method. The contribution of soil water to *C. microphylla* was calculated by IsoSource model and the contribution of rainfall to soil water was calculated by a two-source model.

Important findings The xylem of *C. microphylla* (xylem) showed no seasonal differences in δD, whereas there were significant differences in the water source of plants between two contrasting hydrological environments. In habitats where rainfall was shielded off, *C. microphylla* mainly used the soil water at depth of 0–20 cm, which accounted for 73.30% ± 16.14% of the total water usage; whilst under natural conditions, water uptake by *C. microphylla* was more or less similar at the depths of 0–20 cm, 20–60 cm and 60–100 cm, accounting for 34.66% ± 7.83%, 32.44% ± 7.42%, 32.90% ± 4.14% of the total water usage, respectively. Competition for water between shrubs and grasses gave a possible explanation for different water utilization patterns of the plants. In addition, rainfall accounted for 42.65%–63.92% of the water sources for *C. microphylla*. Results in this study demonstrated

收稿日期Received: 2014-07-07 接受日期Accepted: 2014-12-09

* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: xyli@bnu.edu.cn)

that *C. microphylla* used both summer rains and winter snow, and dynamics of water use in *C. microphylla* reflects its adaptation to the water-limiting arid environment.

Key words source of water use, deuterium isotope, *Caragana microphylla,* plant water use

Citation: 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* bushland in Nei Mongol. *Chinese Journal of Plant Ecology,* 39, 184–196. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0018

在干旱半干旱区, 水分是制约植物生长、物种丰富度、初级生产力以及草原稳定性的主要生态因子(Knapp *et al*., 2001; Bai *et al*., 2004, 2008), 而水文过程决定了土壤-植被系统的演化方向和生态功能(李小雁, 2012)。冬季融雪和夏季降雨是干旱半干旱区土壤水分的主要补给来源。研究干旱区植物对降水的利用情况, 以及在不同水文生境下植物水分利用来源及其适应机制, 对于揭示全球气候变化(降水形式的转变, 降水量的变化)对植物生长的影响至关重要。

氢氧同位素技术已被广泛应用到干旱半干旱区植物水分利用研究方面。研究表明, 犹他州南部的荒漠植物中, 一年生植物(例如*Ambrosia aeanthicarpa, Dicoria brandegei, Helianthus anomolus, Kallstroemia californica*等)和多年生肉质植物(例如*Yucca angustissima*)完全利用夏季降雨; 草本(例如*Astragalus mollissimus, Cordylanthus wrightii, Croton californicus, Cryptantha confertifolia*等)和木本多年生植物(例如*Artemisia filifolia, Atriplex caneseens, Coieogyne ramosissima, Chrysothamnus nauseosus*等)水分利用来源中, 冬季融雪和夏季降雨兼而有之, 其中草本植物倾向于依赖夏季降雨, 木本多年生植物倾向于依赖冬季融雪, 它们之间为水分利用的互补关系(Ehleringer *et al*., 1991)。但科罗拉多平原荒漠生态系统的植物用水来源研究表明浅根草本植物, 二形根生的灌木和深根的木本灌木3种多年生物种利用相同的水分来源, 各物种在干旱环境依赖深层土壤水, 在湿润环境依赖浅层土壤水, 它们之间为水分利用的竞争关系(Schwinning *et al*., 2005)。对于多数的植物物种, 其根系垂直分布空间结构与土壤水分空间分布特征相对应(Dodd *et al*., 1998; Leffler & Caldwell, 2005), 这也决定了植物主要的根系深度(Flanagan *et al*., 1992; Leffler & Caldwell, 2005; Schwinning *et al*., 2005)。有研究表明, 当浅层土壤水分不足以维持植物正常生长时, 植物根系由浅层吸水模式转为深层吸水模式(Nippert & Knapp, 2007)。对于干旱半干旱区的植被, 植物会改变根系吸水层, 最大限度地利用水分, 从而提高自身竞争力适应多变的环境(Ehleringer & Dawson, 1992)。Donovan等通过对比Great Basin沙漠植物种*C. nauseosus*木质部水分和土壤水氢稳定同位素组成(δD)值和氧稳定同位素组成(δ^{18}O)值发现, 该物种不利用夏季降水补充的土壤水, 但是在San Luis峡谷则利用夏季降雨补给的土壤水(Chimner & Cooper, 2004)。目前已有的有关植物用水来源的研究多集中在荒漠、草原和湿生草地生态系统少数植物类型(Dawson *et al*., 2002; Nippert & Knapp, 2007), 对于半干旱区草原生态系统不同植物用水来源的研究相对较少。因此在干旱半干旱草原生态系统, 开展植物在不同生境下用水来源以及策略研究是非常必要的。

小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)是内蒙古草原的优势灌木, 主要分布在锡林河流域, 具有防风固沙的作用(曹成有等, 2004)。近20年来, 小叶锦鸡儿分布呈现明显的增加趋势, 扩张面积达到了5.1 × 10^{10} m^2 (周道玮, 1990; Zhang *et al*., 2006)。目前对小叶锦鸡儿的研究主要集中在景观格局、形成机理和生态水文功能等方面(熊小刚等, 2003; 马成仓等, 2004; 熊小刚和韩兴国, 2005; Li *et al*., 2013; Peng *et al*., 2013), 缺乏其用水来源和适应机制研究。Yang等(2011)通过分析植物与土壤水分的δD, 认为小叶锦鸡儿用水主要来源为深层土壤中的冬季融雪, 但是该研究并未准确量化降水对不同深度土壤各层水分的贡献率, 而是将深层土壤中的水分近似为都由冬季融雪补给, 因此其研究结果仍存在不确定性。

本研究以内蒙古草原小叶锦鸡儿灌丛为研究对象, 通过分析小叶锦鸡儿(木质部)水与潜在水源(降雪、降雨、土壤水)的δD, 定量分析各水源对小叶锦鸡儿水分的贡献率, 从而揭示小叶锦鸡儿在不同水分条件下植物水分利用的空间变化, 及其对夏季降雨的利用情况, 为深入研究干旱半干旱区草原生态

系统植物用水策略提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区太仆寺旗境内的北京师范大学农田-草地生态观测实验站附近(114.85°–115.82° E, 41.58°–42.17° N), 属于典型的温带半干旱大陆性气候, 年平均气温1.6 ℃, 年降水量407 mm, 年蒸发量1 900 mm。太仆寺旗属内蒙古典型草原区, 以小叶锦鸡儿为主的灌丛呈斑块状或岛状广泛散布在草原上。土壤类型以栗钙土为主, 有机质含量低, 土壤较贫瘠(彭海英, 2011)。

本研究设置两个处理: (1)遮雨处理, 代表仅受冬季降雪而不受夏季降雨影响且较干旱的水文环境; (2)自然状态, 既受降雪影响又受降雨影响(图1)。为了避免地形和土壤异质性等因素带来的系统误差以及牛羊放牧带来的影响, 本实验选择了地势平坦和植被一致的两个相邻样地(相隔5 m), 并修建围栏对其进行保护。遮雨处理的样地面积为2 m × 4 m, 顶棚采用透光性较好的防水薄膜, 高度为1.5 m。对于遮雨处理地下部分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。地上部分利用挡雨棚进行挡雨处理, 模拟不受降雨影响只有冬季融雪补给的极端水文环境。对比遮雨处理和自然状态的两个采样点, 可以分析小叶锦鸡儿对不同土壤层水分的利用情况。分析自然状态下降雨对各土壤层的水分补给以及小叶锦鸡儿对各层土壤水分的利用情况, 从而说明小叶锦鸡儿对夏季降雨的利用情况。采样点地下水位在5 m左右, 因此不考虑该地区地下水对0–100 cm土壤水分的补给和小叶锦鸡儿根系对地下水的利用。

距离采样点20 m处安装微型自动气象站(Dyna-Met, Dynamax, Houston, USA), 测定降水、温湿度和风速, 记录时间间隔为10 min。

1.2 实验方法和样品分析

1.2.1 样品采集

样品采集于2013年4月20日、6月9日、6月14日、7月8日、7月14日和8月9日。在遮雨处理和自然状态两个采样点分别选取生长状况良好、相近且相似的小叶锦鸡儿3株, 每株选取栓化枝条3枝, 剪取靠近地面的4–5 cm部分, 并迅速剥去表皮。在采样植株附近采集不同深度的土壤样品(3个重复), 深度分别为0–5、5–10、10–20、20–40、40–60、60–80、80–100 cm, 每层土壤样品分为两部分, 分别用以提取土壤水分用于测定同位素和用烘干法测定土壤含水量。在采样点附近设置雨量筒, 采集每次降水样品, 每次3个重复。所有植物和土壤样品装入10 mL带螺纹口的玻璃瓶中, 用PARAFILM封口膜封口并置于–18 ℃冰柜中冷冻, 水样装于50 mL塑料方瓶中封口, 并在–2 ℃下冷藏, 直到用于分析氢稳定同位素组成。

1.2.2 水分提取和同位素测定

植物和土壤水分提取及不同水体的δD测定均在北京师范大学水文土壤校级重点实验室完成, 使用LI-2000植物水和土壤水抽提装置(北京理加联合科技有限公司, 北京)采用低温真空蒸馏法(Yang *et al.*, 2010)提取水分, 用LGR(908-0008)液态水同位素分析仪(Lios Gatos Research, Mountain View, USA)测定各水体的δD, 测定结果以维也纳标准平均海水(VSMOW)校正, 测定精度为0.3‰。利用低温真空蒸馏抽提技术获得的植物叶片和茎秆水中含有甲醇和乙醇类有机污染物, 造成激光同位素分析仪的测量值出现偏差。因此利用纯水混入不同浓度的色谱纯甲醇或乙醇, 结合Los Gatos公司的LWIA- Spectral ContaminationIdentifier v1.0光谱分析软件确定甲醇(NB)和乙醇(BB)类物质污染程度的光谱度量值, 建立δ^{18}O和δD的光谱污染校正方法(Wu *et al.*, 2013; 刘文茹等, 2013)。校正过程中有关甲醇和乙醇溶液浓度的配置方式与孟宪菁等(2012)的相关实验相同。窄带系数(*NB*)的对数与δD和δ^{18}O均呈显著二次曲线关系, 分别为$\Delta\delta\mathrm{D} = 0.228(\ln NB)^2 - 0.3084\ln NB + 1.4731$ ($R^2 = 0.992\ 9$), $\Delta\delta^{18}\mathrm{O} = 0.1645\ (\ln NB)^2 - 0.2794\ln NB + 0.6913$ ($R^2 = 0.992\ 7$)。通常大多数植物和土壤水样品中乙醇类物质浓度<20 mL·L^{-1}, δD可以被校正(孟宪菁等, 2012)。因此本文宽带系数(*BB*)选择<1.2, 得到*BB*与$\Delta\delta$D呈显著线性关系, $\Delta\delta\mathrm{D} = 14.909BB - 15.632$ ($R^2 = 0.845\ 5$)。

1.2.3 根系密度调查

6月份进行了小叶锦鸡儿根系调查。在采样点附近, 选取与采样植株邻近并生长状况相似的小叶锦鸡儿3株, 用直接挖掘法自地表向下调查1 m × 1 m范围内每隔10 cm的根系密度, 直到120 cm处。

1.2.4 数据分析

氢(H)和其稳定同位素氘(D)的组成关系可用δD (‰)表示:

$$\delta \mathrm{D} = \left[\frac{R_{\mathrm{sample}}}{R_{\mathrm{standard}}} - 1 \right] \times 1000‰ \quad (1)$$

其中, R_{sample}和R_{standard}分别为样品和标准水样的同位素组成(D和H的分子数比值)(Gonfiantini, 1978; Ehleringer *et al*., 2000)。

由于氢原子与其同位素的差异大于氧原子与其同位素的差异, 大多数有关植物用水来源的示踪研究多采用氢同位素(White *et al*., 1985; Donovan & Ehleringer, 1994)。小叶锦鸡儿的夏季降水和冬季融雪的δD在线性拟合中具有强相关性(R^2 = 0.89和0.92), 说明小叶锦鸡儿在水分吸收上对氘不存在选择差异性, 故选用氢同位素进行用水来源的示踪(图3)。

土壤水分来源分析主要利用两元线性混合模型进行模拟。在夏季降雨和冬季融雪两水源下, 降雨对土壤水分的贡献率(f)为:

$$f = \frac{\delta \mathrm{D_S} - \delta \mathrm{D_B}}{\delta \mathrm{D_R} - \delta \mathrm{D_B}} \times 100\% \quad (2)$$

其中, $\delta \mathrm{D_S}$为降雨后土壤水分的δD值; $\delta \mathrm{D_R}$和$\delta \mathrm{D_B}$为夏季降雨和冬季融雪的δD值。$\delta \mathrm{D_R}$和$\delta \mathrm{D_B}$作为水源, 即为δD值两个极值(Xu *et al*., 2011)。由于地表的强蒸发作用, 土壤水分δD值有可能高于夏季降雨的δD值, 尤其是在干旱和半干旱地区, 此时将f设为1 (Li *et al*., 2006; Cheng *et al*., 2006)。当土壤水分δD值低于冬季融雪的δD值时, 则将f设为0 (Cheng *et al*., 2006)。

植物中氢和氧主要来源于水, 包括植物所能利用的主要水分来源, 如降水、土壤水和地下水, 其中土壤水、径流和地下水最初全部来自降水。土壤水分输入的季节变化、地浅层的蒸发或土壤水和地下水之间存在差异, 因此土壤水分会产生同位素组成的梯度(isotopic composition gradients)。同时, 因为陆地植物根吸收水分时, 不会发生氢和氧同位素的分馏(White *et al*., 1985; Dawson & Ehleringer, 1991), 植物的根和茎内水的δD、δ^{18}O值与土壤中可供植物吸收的水的δD、δ^{18}O值相近。因此本研究主要利用基于多源质量平衡的IsoSource多源混合模型(Phillips & Gregg, 2003)比较不同层次土壤中水分和植物茎(木质部)水分的δD和δ^{18}O的值, 量化不同深度土壤水分对两个采样点小叶锦鸡儿用水的相对贡献率, 计算增幅为5%, 不确定水平为0.2 (Wang *et al*., 2010)。

利用SPSS 17.0 (SPSS, Chicago, USA)和Oringin 8.0对各水源以及植物δD值季节变化特征进行统计学分析。

2 结果和分析

2.1 降水量及其δD值分析

研究区降水主要集中在6–9月, 降水量占全年的60%–80% (Yang *et al*., 2011)。2013年实验区降水较多, 达到445 mm。7月份降水量达到最大值, 为142.3 mm; 6月、8月次之, 分别为135.6 mm和80.9 mm; 9月则为51.3 mm。图2中同位素变化说明1–4月降水以降雪形式为主, δD平均值为–166.05‰ ± 49.43‰, 5–10月降水以降雨形式为主, δD平均值为–44.45‰ ± 29.67‰, 11月既有降雪又有降雨, δD值波动较大, 平均值为–133.91‰ ± 84.63‰。

大气降水中δD与δ^{18}O之间的关系称为大气降水线。研究区降雪、降雨、土壤水分和植物水分的δD与δ^{18}O存在显著相关性。如图3所示, 降雪线的斜率为8.60, 截距为24.40 (R^2 = 0.94); 当地大气水线的斜率为7.88, 截距为7.74 (R^2 = 0.99), 靠近全球大气水线δD = 8.2 δ^{18}O + 11.27 (Rozanski *et al*., 1993)。遮雨处理条件下, 部分土壤水分δD/δ^{18}O值点沿着降雪线附近分布, 这表明该土壤水主要由冬季融雪补给。由于受降水和土壤蒸发的共同影响, 自然状态土壤水分δD/δ^{18}O值点分布在研究区大气水线下方。遮雨处理下土壤水分δD/δ^{18}O拟合线的斜率和截距分别为5.49和–39.80 (R^2 = 0.95); 自然状态下则为6.01和–24.37 (R^2 = 0.95)。相较而言, 小叶锦鸡儿δD/δ^{18}O的拟合线的斜率和截距更接近各自土壤水分的拟合线, 遮雨处理下小叶锦鸡儿δD/δ^{18}O拟合线的斜率和截距分别为5.87和–32.71 (R^2 = 0.89); 自然状态下则为5.95和–30.33 (R^2 = 0.92), 此结果说明土壤水分为小叶锦鸡儿的直接用水来源。

本次实验共采集了6次降水事件后的植物和土壤样品, 采样时间均为降水后1–2天, 日期分别为4月20日(降雪)、6月11日、6月15日、7月8日、7月14日和8月9日。六次降水事件的降水特征如表1所示, 降水量具有一定的梯度变化, 较具代表性。表中6月

doi: 10.17521/cjpe.2015.0018

图1 遮雨处理(**A**)和自然状态(**B**)采样点景观图。
Fig. 1 Photographs showing experimental treatments of rain-exclusion (**A**) and natural (**B**) conditions.

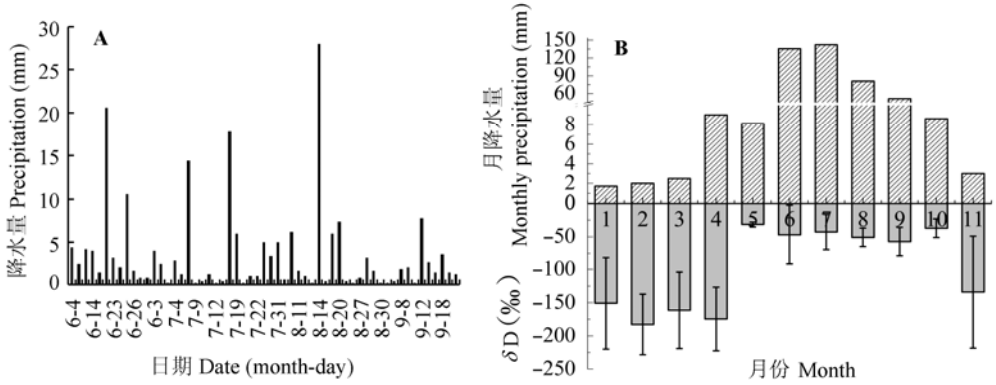

图2 生长季内降水量变化(**A**)和2013年实验地降水量和氢稳定同位素比率(*δ*D)的月尺度变化(**B**)(平均值±标准偏差)。
Fig. 2 Changes of rainfall during growing season (**A**) and monthly changes of precipitation and hydrogen stable isotope ratios (*δ*D) (**B**) in the experimental field in 2013 (mean ± *SD*).

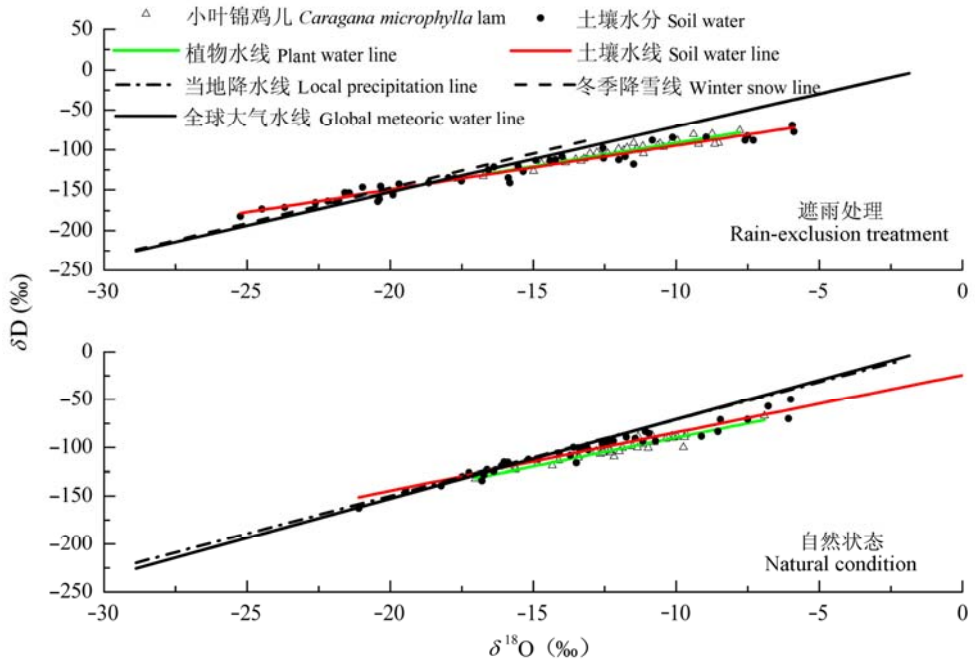

图3 研究区降雨、融雪、土壤水分以及植物各水线和全球大气水线。*δ*D, 氢稳定同位素比率; δO^{18}, 氧稳定同位素比率。
Fig. 3 Plots of *δ*D versus δO^{18} values of precipitation, soil water and plant water in the study area and global meteoric water line. *δ*D, hydrogen stable isotope ratios; δO^{18}, oxygen stable isotope ratios.

表1 6次降水事件的特征
Table 1 Features of six precipitation events

日期 Date (month-day)	降水量 Precipitation (mm)	降水强度 Precipitation intensity ($mm \cdot h^{-1}$)	δD (‰)	月平均δD (平均值±标准偏差) Monthly average δD (‰) (mean ± *SD*)
6-9	6.6	0.2	–54.01	–48.20 ± 46.20
6-14	4.2	1.0	–5.89	–48.20 ± 46.20
7-8	15.6	1.2	–10.01	–42.80 ± 26.50
7-12	2.0	0.2	–38.47	–42.80 ± 26.50
8-8	6.2	3.6	–38.10	–50.84 ± 32.52

δD, 氢稳定同位素比率。
δD, hydrogen stable isotope ratio.

份降雨的δD值波动较大, 表明6月份水汽来源较为多变。

2.2 根系分布特征

如图4所示, 10–20 cm和20–30 cm土层为根密度最大区域, 密度为40.64×10^{-3}和41.69×10^{-3} $kg \cdot m^{-2}$, 占所调查土层范围内根系总量的21.97%和22.54%。根据根系分布将土壤分为0–20、20–60和60–100 cm, 其根密度分布为56.63×10^{-3}、104.21×10^{-3}和21.28×10^{-3} $kg \cdot m^{-2}$, 其中20–60 cm为根密度最大区, 其根系占所调查土层范围内根系总量的56.34%。

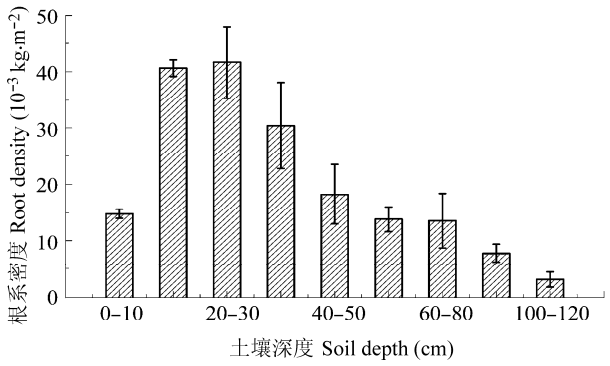

图4 不同土壤深度小叶锦鸡儿的根系分布特征(平均值±标准偏差)。
Fig. 4 Density of *Caragana microphylla* roots at different soil depths (mean ± *SD*).

2.3 土壤水分

2.3.1 土壤含水量

土壤含水量主要受降水、土壤质地等因素的共同影响。遮雨处理的样点由于没有夏季降雨补给, 各层土壤水分随着时间推移有明显的减少趋势(图5), 但仍高于萎蔫系数0.027 $kg \cdot kg^{-1}$ (贾海坤等, 2006), 为小叶锦鸡儿可利用水分范围。此外, 该样点的土壤水分随深度增加呈现先增加后减少的趋势, 在10–20和20–40 cm土壤含水量达到了峰值, 这与根系密度分布情况相一致(图4)。深层土壤水分的减少主要是由于没有水分补给以及植物根系吸水作用, 而浅层土壤水分的减少有土壤蒸发、无水分补给以及植被根系吸收等多个原因(Li *et al*., 2013)。

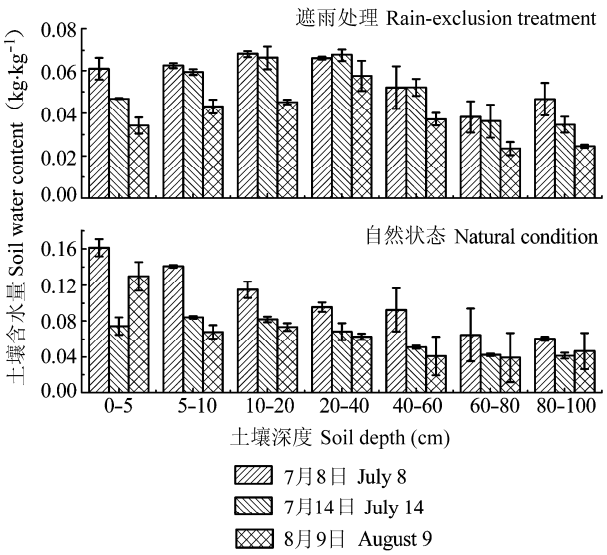

图5 降雨事件后遮雨处理和自然状态不同深度的土壤含水量(平均值±标准偏差)。
Fig. 5 Soil water content at different soil depths following rainfall events under rain-exclusion and natural conditions (mean ± *SD*).

自然状态下各层土壤含水量均高于遮雨处理对应土层的土壤含水量, 表明夏季降雨对各层土壤水分均具有一定的补给作用, 尤其是浅层土壤含水量, 受降雨影响波动较大, 其变化与降雨量变化趋势相一致。降雨量不同, 降水补给深度也有一定的区别, 尤其是对深层土壤水分补给的影响。因此本研究中3次土壤含水量的采样分别选择降雨量为15.6、2.0和6.2 mm三次具有代表性的降雨事件后。7月8日的大降雨事件使得各层土壤含水量都有显著增加。经过6天后虽有2 mm的降水补给, 但各土层的含水量明显降低, 说明各层土壤蓄水能力较差, 降雨的累计影响效应并不明显。虽然8月8日降雨量大于7月12日降雨量, 但降雨并未使得8月9日10–80 cm的各层土壤含水量高于7月14日的土壤含水量。

2.3.2 土壤水分δD值

遮雨处理模拟的是不受降雨影响的水分条件,

doi: 10.17521/cjpe.2015.0018

因此各土层的水分补给主要为冬季融雪，深层土壤水分的δD值靠近雪样值(图3)。0–20 cm土壤由于受土壤蒸发影响，其土壤水分同位素值大于其他深度土壤水分的同位素值，并随着时间推移该层土壤水分同位素值呈稳步增大趋势(表2)。自然状态下的样点由于受冬季融雪和夏季降雨的共同影响，各层土壤水分的δD值均大于遮雨处理对应各层的土壤水分δD值，但介于降雪样与降雨样之间。4月20日为降雪后采样，因此两个样点浅层土壤水分δD值都接近降雪样值(表2)。6月15日降雨样δD值达到了–5.89‰，降水补给使得自然状态下的各层土壤水分的δD值都有大幅度的增加。对土壤水分δD值与降雨特征(降雨量、降雨强度、降雨δD值、降雨后采样时间)和土壤深度进行Pearson相关性分析，结果显示土壤水分δD值与降雨后采样时间呈显著负相关，与降雨样δD值呈显著正相关，相关系数分别是–0.546和0.550 ($p < 0.001$)。此结果表明降雨对土壤水分δD值具有显著影响，但随着时间推移，降雨对其影响作用会有所削弱。

为了量化降雨对各层土壤水分的补给作用，利用两元线性混合模型计算自然状态降雨对各层土壤水分贡献率(表3)。结果表明：对于0–20 cm，降雨为主要贡献水源，贡献率为63.23%–80.13%；20–60 cm，由于根系较多土质较为疏松，降雨多以优势流形式下渗进入深层土壤，因此冬季融雪为该土层主要的补给水源，降雨贡献率为36.61%–38.95%；60–100 cm则由降雨与降雪共同作用，降雨贡献率为46.51%–48.67%。

2.4 植物水分分析

2.4.1 植物水分δD值季节变化

除海岸带湿地植物外，水分在由植物根系向茎干输送的过程中氢氧同位素未因蒸发或新陈代谢导致分馏，因此木质部中氢氧同位素可以反映植物的水分来源(Lin *et al*., 1993)。图6所示，随着季节变化，

表2 不同深度土壤水分的氢稳定同位素比率(δD, ‰)的季节变化(平均值±标准偏差)
Table 2 Seasonal variation of hydrogen stable isotope ratio (δD, ‰) in soil water (mean ± *SD*)

土壤深度 Soil depth (cm)	遮雨处理 Rain-exclusion treatment					
	日期 Date (month-day)					
	4-20	6-11	6-15	7-8	7-14	8-9
0–5	–151.46 ± 17.39^{a}	–109.92 ± 30.98^{a}	–93.19 ± 35.33^{a}	–82.37 ± 6.97^{a}	–82.53 ± 18.76^{a}	–85.90 ± 4.45^{a}
5–10	–140.87 ± 27.79^{a}	–132.75 ± 34.01^{a}	–125.13 ± 22.85^{a}	–111.30 ± 1.96^{ab}	–96.05 ± 16.53^{a}	–97.08 ± 12.39^{ab}
10–20	–116.40 ± 5.83^{abc}	–144.64 ± 7.83^{a}	–137.39 ± 25.87^{a}	–124.57 ± 15.03^{abc}	–110.08 ± 36.13^{a}	–98.74 ± 16.74^{ab}
20–40	–89.31 ± 1.60^{c}	–163.35 ± 30.89^{a}	–148.37 ± 32.38^{a}	–152.23 ± 16.11^{bc}	–132.06 ± 9.74^{b}	–119.34 ± 22.01^{abc}
40–60	–92.37 ± 29.59^{c}	–154.73 ± 39.10^{a}	–143.87 ± 41.27^{a}	–155.80 ± 13.31^{c}	–142.22 ± 9.81^{bc}	–128.18 ± 17.92^{bc}
60–80	–101.28 ± 16.09^{bc}	–138.64 ± 42.40^{a}	–136.51 ± 37.99^{a}	–166.77 ± 21.93^{c}	–154.07 ± 0.23^{c}	–138.05 ± 12.59^{c}
80–100	–88.28 ± 13.99^{c}	–133.77 ± 29.10^{a}	–111.70 ± 14.02^{a}	–140.27 ± 18.60^{b}	–150.10 ± 10.17^{c}	–145.18 ± 0.42^{c}
总计 Total	–111.42 ± 28.30	–139.69 ± 28.91	–129.43 ± 30.40	–133.33 ± 30.28	–123.87 ± 29.85	–114.16 ± 23.93
土壤深度 Soil depth (cm)	自然状态 Natural condition					
	日期 Date (month-day)					
	4-20	6-11	6-15	7-8	7-14	8-9
0–5	–161.74 ± 1.21^{a}	–80.65 ± 11.33^{a}	–46.96 ± 14.16^{a}	–44.55 ± 7.54^{a}	–39.07 ± 4.72^{a}	–73.09 ± 3.86^{a}
5–10	–145.11 ± 7.93^{a}	–116.48 ± 0.62^{b}	–82.27 ± 16.08^{ab}	–55.23 ± 22.23^{a}	–58.54 ± 18.07^{ab}	–83.77 ± 0.03^{ab}
10–20	–129.67 ± 41.18^{a}	–143.01 ± 12.45^{c}	–108.05 ± 23.09^{b}	–75.70 ± 19.69^{ab}	–80.23 ± 14.00^{bc}	–80.38 ± 18.94^{a}
20–40	–143.43 ± 33.96^{a}	–135.82 ± 8.17^{c}	–100.7 ± 20.72^{b}	–119.97 ± 19.88^{c}	–109.48 ± 9.59^{c}	–113.12 ± 21.33^{b}
40–60	–137.41 ± 38.22^{a}	–111.21 ± 3.98^{b}	–103.35 ± 32.47^{b}	–124.08 ± 16.14^{c}	–115.16 ± 30.70^{c}	–103.35 ± 16.54^{ab}
60–80	–106.92 ± 32.80^{a}	–103.74 ± 8.42^{b}	–93.11 ± 8.75^{ab}	–115.80 ± 10.20^{bc}	–100.41 ± 13.57^{c}	–91.16 ± 4.62^{ab}
80–100	–111.89 ± 21.70^{a}	–109.07 ± 5.05^{b}	–87.31 ± 17.86^{ab}	–129.67 ± 20.34^{c}	–92.01 ± 8.95^{bc}	–100.55 ± 0.26^{ab}
总计 Total	–135.54 ± 28.58	–114.28 ± 20.77	–88.82 ± 24.72	–95.00 ± 36.50	–84.59 ± 30.37	–92.24 ± 17.18

同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。
Different letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$).

表3 自然状态下降雨对不同深度土壤水分δD值的贡献率
Table 3 Contribution of rainfall to soil water at different depths under natural conditions

土壤深度 Soil depth (cm)	日期 Date (month-day)					平均值 Mean
	6-11	6-15	7-8	7-14	8-9	
0–5	76.22%	74.36%	77.87%	99.53%	72.65%	80.13%
5–10	44.25%	52.31%	71.02%	84.27%	64.31%	63.23%
10–20	20.57%	36.21%	57.90%	75.03%	66.96%	51.33%
20–40	26.99%	40.80%	29.53%	44.34%	41.37%	36.61%
40–60	48.95%	39.15%	26.90%	39.89%	39.87%	38.95%
60–80	55.62%	45.54%	32.21%	51.45%	58.53%	48.67%
80–100	50.86%	49.16%	23.32%	58.03%	51.19%	46.51%

两个样点的小叶锦鸡儿δD值整体变化并不明显, 分别为–101.36‰ ± 13.02‰和–101.18‰ ± 12.71 ‰。利用SPSS的单因素方差分析结果表明, 遮雨处理(p = 0.136)和自然状态(p = 0.155)下小叶锦鸡儿季节变化差异并不显著。Yang等(2011)在内蒙古有关小叶锦鸡儿灌丛用水来源的实验也证实了小叶锦鸡儿δD值季节差异性不大。此外, 对比两个样点小叶锦鸡儿的δD值, 植物水分δD值并无太大差异(图6)。

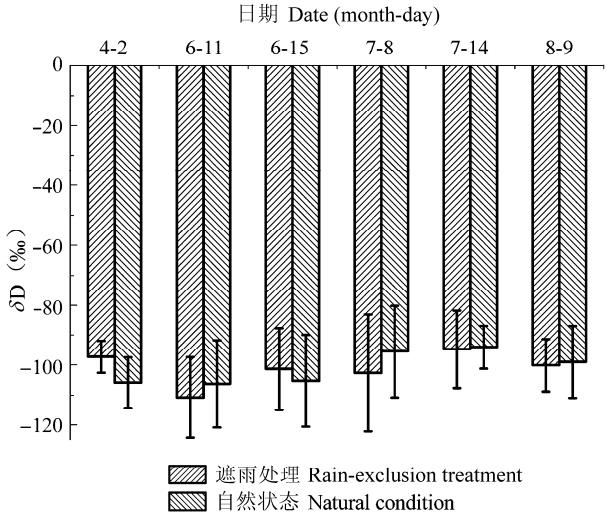

图6 两个采样点小叶锦鸡儿水分氢稳定同位素比率(δD)比较(平均值±标准偏差)。
Fig. 6 Comparison of hydrogen stable isotope ratio (δD) in *Caragana microphylla* between two sampling sites (mean ± *SD*).

2.4.2 植物用水来源分析

通过对比小叶锦鸡儿与不同深度土壤水δD值(图7), 利用IsoSource多源混合模型(Phillips & Gregg, 2003)计算各层土壤水对小叶锦鸡儿的相对贡献率(图8)。

遮雨处理下小叶锦鸡儿δD值与0–20 cm土壤层水分的δD值较为接近(图7), 通过混合模型分析其对浅层土壤水分的平均利用率达到了73.30% ± 16.14% (图8)。

自然状态各层土壤对小叶锦鸡儿用水的贡献率较为平均, 0–20、20–60、60–100 cm各土壤层土壤水分贡献率分别为34.66% ± 7.83%、32.44% ± 7.42%、32.90% ± 4.14%。对自然状态不同深度土壤水分δD值与小叶锦鸡儿水分δD值进行Pearson相关性分析, 结果表明小叶锦鸡儿水分δD值与深度为5–10 cm和10–20 cm土壤水分样δD值存在显著正相关, 相关系数分别是0.830和0.936 (p < 0.05)。此结果表明0–20 cm土壤层的水分与小叶锦鸡儿的用水来源存在更为紧密的关系。

通过两源模型得到的降雨对各土壤层的贡献率以及IsoSource多源混合模型得到的各土壤层对小叶锦鸡儿用水的贡献率, 可以获得降雨对小叶锦鸡儿的贡献率。在由夏季降水和冬季降雪共同补给的自然状态下, 小叶锦鸡儿对降雨的利用率为42.65%–63.92%。

3 结论和讨论

3.1 遮雨处理和自然状态下小叶锦鸡儿用水来源情况分析

遮雨和自然状态下小叶锦鸡儿δD的季节差异并不明显, 分别为–101.36‰ ± 13.02‰和–101.18‰ ± 12.71‰。模型和统计学分析结果表明遮雨和自然状态下, 0–20 cm土壤层的水分较其他土壤层的水分与小叶锦鸡儿的用水来源存在更为紧密的联系。该结论与Bazzaz (1996)的研究结果一致, 植物由于固有的根系深度和生活用水策略只能使用有限的水资源, 而不是改变用水策略。

不同生境下植物用水主要取决于当地年降水模式、降水方式、地下水位的高低以及土壤水的可获得性(杜雪莲和王世杰, 2011)。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利用浅层土壤水分。本研究的两个样地分别代表了是否受夏季降雨影响的两个不同水分条件。遮雨处理样地的各层土壤水分来源主要为冬季融雪补给, 结果表

doi: 10.17521/cjpe.2015.0018

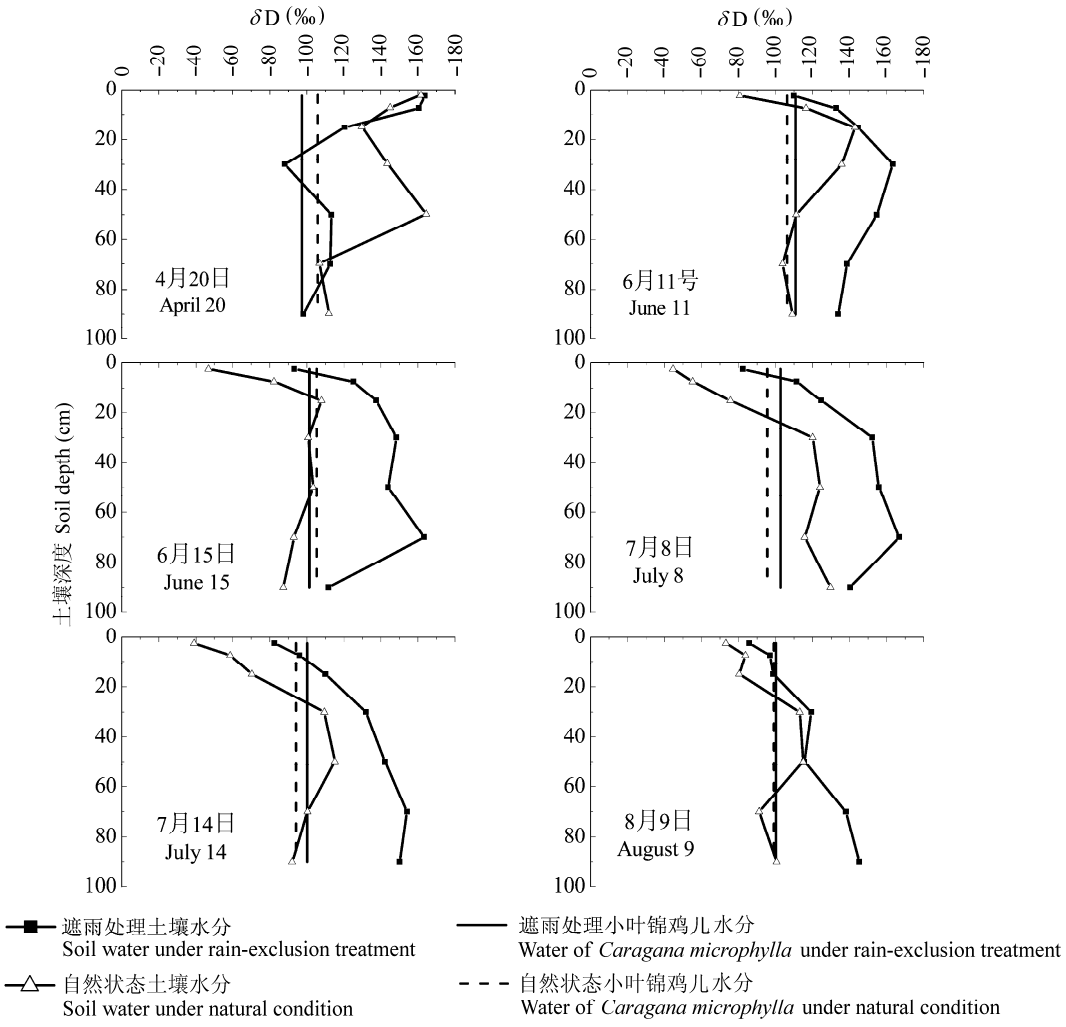

图7 不同月份植物水分与不同深度土壤水分氢稳定同位素比率(δD)的比较。
Fig. 7 Comparisons of hydrogen stable isotope ratio (δD) for plants and soil water at different depths in different months.

明: 在没有降雨补给的情况下, 小叶锦鸡儿对土壤水分的利用更依赖于0–20 cm土壤层对的水分。由于草本植物、仙人掌类植物主要利用来自近期降雨的浅层土壤水(Cheng *et al*., 2006; 褚建民, 2007)。而遮雨处理下的表层土壤水分没有降雨补给, 土壤水分降低, 使草本植物在生长季中前期陆续枯死, 使小叶锦鸡儿在水分利用中缺少了竞争对手, 优先利用浅层土壤水分。在生长后期, 由于土壤蒸发消耗了较多的土壤水分且无降雨补给, 土壤水分含量持续下降, 小叶锦鸡儿也出现局部枝条萎蔫枯死等缺水症状。在有降雨补给的自然状态下, 降雨改变了各层土壤水分的组成。结果显示小叶锦鸡儿对各层土壤的水分利用情况较为均衡, 保证了小叶锦鸡儿生长所需的水分, 利于小叶锦鸡儿的生长。由于与草本植物等浅根植物的水分竞争关系, 小叶锦鸡儿对0–20 cm土壤水分利用的优势对比于遮雨处理下的并不明显, 但相关分析表明它们仍然存在较为显著的相关性。本研究结果表明不同灌草竞争程度可能会影响小叶锦鸡儿对不同土层水分的利用, 但其内在机理还有待进一步研究。

3.2 小叶锦鸡儿对降水利用情况分析

夏季降水与冬季降水有着不同的D和^{18}O同位素组成, 有研究表明, 夏季降水对深层土壤的水分恢复没有补给作用, 而冬季降水对深层土壤和蓄水层的水分恢复都有作用(褚建民, 2007)。同时, 有研究显示不同功能型(生活型)植物从不同深度的土壤层中提取水分, 对源于冬季和源于夏季的土壤水分的利用方式不同(Burgess *et al*., 2000)。土壤水δD值受降水、蒸发、地下水、土壤质地以及土壤含水量等因素的影响。Xu等(2011)的研究表明降雨对土壤

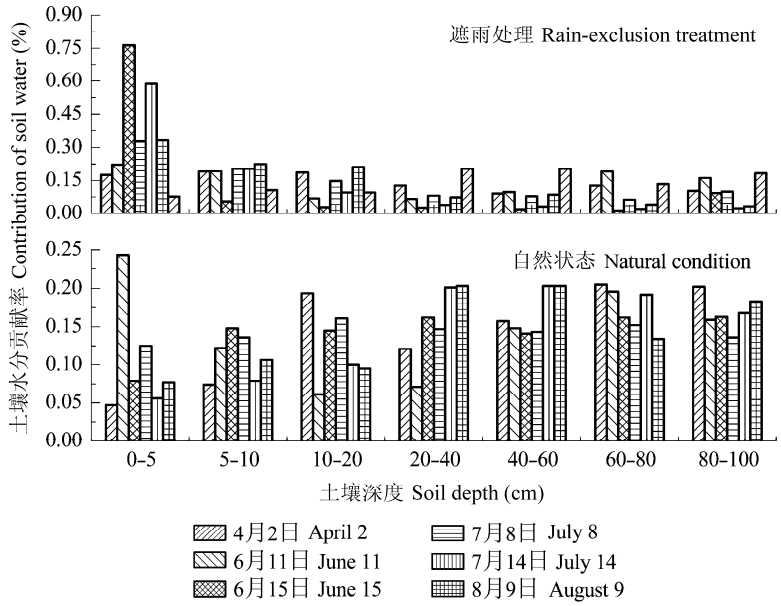

图8 不同土壤层水分对植物水分贡献率。
Fig. 8 Contribution of soil water at different depths to plant water.

水分的影响能持续4–6天, 并在第二天达到峰值。对于受夏季降水补给的自然状态下的采样点, 其土壤水分δD值与降水的δD值存在显著正相关, 而与降雨采样时间存在显著负相关, 即表明降雨对土壤水分δD值具有显著影响, 但随着时间推移, 降雨对其影响作用会有所削弱。

河岸树木和深根性灌木主要利用深层土壤水或地下水(Lin & Sternberg, 1994), 而灌木和一些树木经常利用几种水源的混合水分(Rose *et al*., 2003)。在由夏季降水和冬季降雪共同补给的自然状态下, 小叶锦鸡儿对降雨的利用率为42.65%–63.92%。因此, 在有夏季降水补给的自然状态下的小叶锦鸡儿, 其用水来源由冬季降雪和夏季降水共同组成。

全球气候变化对整个生态过程都存在一定程度的影响(Vitousek, 1994)。除了温度和空气中CO_2浓度的增加, 气候模型预测全球尺度上降水格局也会发生一定的改变(Griggs & Noguer, 2002)。虽然不同气候模型对降水格局变化的预测有所不同, 但大体符合两种趋势: (1)平均降水量的变化将会成为特定季节性的, 因此冬季降水变化方向与幅度与夏季降雨不是同一个趋势; (2)降水量的年际变化将有可能呈增加趋势(Dettinger *et al*., 1998; Groisman *et al*., 1999; Easterling *et al*., 2000)。全球气候变化带来降水格局的改变, 夏季降雨的增加将会使得小叶锦鸡儿利用水分土壤层范围增加, 更利于其在干旱半干旱地区生长。但若出现夏季降雨量减少和周期性的干旱, 小叶锦鸡儿对0–20 cm土壤水分有较强的依赖性, 与浅根植物的水分竞争加剧。一旦有限的土壤层范围内的水分不能满足小叶锦鸡儿正常生长的水分需要, 小叶锦鸡儿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(Yang *et al*., 2011)。

综上所述, 本研究结果揭示了小叶锦鸡儿在遮雨处理和自然状态下植物水分利用的空间变化, 及其对夏季降雨的利用情况, 为研究干旱半干旱区草原生态系统植物用水策略提供了参考。但预测全球气候变化, 尤其是降雨格局的改变对干旱半干旱地区植被群落结构变化及其演替方向的影响, 还需要结合不同水文环境中小叶锦鸡儿与共生草本植物的水分竞争关系的进一步深入研究。

基金项目 国家自然科学基金(91425301和41321001)、国家杰出青年科学基金(41025001)、中央高校基本科研业务费资助项目(2012CXQT07)和长江学者和创新团队计划资助项目(IRT1108)。

doi: 10.17521/cjpe.2015.0018

参考文献

Bai YF, Han XG, Wu JG, Chen ZZ, Li LH (2004). Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature,* 431, 181–184.

Bai YF, Wu JG, Xing Q, Pan QM, Huang JH, Yang DL, Han XG (2008). Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau. *Ecology,* 89, 2140–2153.

Bazzaz FA (1996). *Plants in Changing Environments: Linking Physiological, Population, and Community Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Burgess SSO, Adams MA, Turner NC, Ward B (2000). Characterisation of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: Implications for tracing water sources of trees. *Agricultural Water Management,* 45, 229–241.

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

Chu JM (2007). *Study on Water Utility of Plant in Arid Area*. PhD dissertation, Chinese Academy of Forestry, Beijing. (in Chinese with English abstract). [褚建民 (2007). 干旱区植物的水分选择性利用研究. 博士学位论文, 中国林业科学研究院, 北京]

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

Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, Templer PH, Tu KP (2002). Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 507–559.

Dettinger MD, Cayan DR, Diaz HF, Meko DM (1998). North-South precipitation patterns in western north america on Interannual-to-Decadal timescales. *Journal of Climate,* 11, 3095–3111.

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.

Donovan LA, Ehleringer JR (1994). Water stress and use of summer precipitation in a Great Basin shrub community. *Functional Ecology,* 8, 289–297.

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.]

Easterling DR, Meehl GA, Parmesan C, Changnon SA, Karl TR, Mearns LO (2000). Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science,* 289, 2068–2074.

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

Ehleringer JR, Phillips SL, Schuster WS, Sandquist DR (1991). Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia,* 88, 430–434.

Ehleringer JR, Roden J, Dawson TE (2000). Assessing ecosystem-level water relations through stable isotope ratio analyses. In: Sala OE, Jackson RB, Mooney HA, Howarth RW eds. *Methods in Ecosystem Science.* Springer, New York. 181–198.

Flanagan LB, Ehleringer JR, Marshall JD (1992). Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell & Environment,* 15, 831–836.

Gonfiantini R (1978). Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature,* 271, 534–536.

Griggs DJ, Noguer M (2002). Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather,* 57, 267–269.

Groisman PY, Karl TR, Easterling DR, Knight RW, Jamason PF, Hennessy KJ, Suppiah R, Page CM, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev VN, Douglas A, Førland E, Zhai PM (1999). Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change,* 42, 243–283.

Jia HK, Liu YH, Xu X, Wang K, Gao Q (2006). Simulation of soil water dynamics in a *Caragana intermedia* woodland in Huangfuchuan watershed: Relationship among slope, aspect, plant density and soil water content. *Journal of Plant Ecology* (*Chinese Version*), 29, 910–917. (in Chinese with English abstract) [贾海坤, 刘颖慧, 徐霞, 王昆, 高琼 (2006). 皇甫川流域柠条林地水分动态模拟——坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系. 植物生态学报, 29, 910–917.]

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.

Leffler AJ, Caldwell MM (2005). Shifts in depth of water extraction and photosynthetic capacity inferred from stable isotope proxies across an ecotone of *Juniperus osteosperma* (Utah juniper) and *Artemisia tridentata* (big sagebrush). *Journal of Ecology,* 93, 783–793.

Li SG, Tsujimura M, Sugimoto A, Sasaki L, Yamanaka T, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M (2006). Seasonal variation in oxygen isotope composition of waters for a montane larch forest in Mongolia. *Trees-Structure and Function,* 20, 122–130.

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, Hu X, Ma YJ (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.

Lin GH, Sternberg L (1994). Utilization of surface-water by red mangrove (*Rhizophora mangle* L.): An isotopic study. *Bulletin of Marine Science,* 54, 94–102.

Lin GH, Sternberg L, da SL (1993). Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants. In: Ehleringer JR, Hall AE, Farquhar GD eds. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations.* Academic Press, San Diego, USA. 497–510.

Liu WR, Peng XH, Shen YJ, Chen XM (2013). Measurements of hydrogen and oxygen isotopes in liquid water by isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS) and their spectral contamination corrections. *Chinese Journal of Ecology,* 32, 1181–1186. (in Chinese with English abstract) [刘文茹, 彭新华, 沈业杰, 陈效民 (2013). 激光同位素分析仪测定液态水的氢氧同位素及其光谱污染修正. 生态学杂志, 32, 1181–1186.]

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.]

Meng XJ, Wen XF, Zhang XY, Han JY, Sun XM, Li XB (2012). Potential impacts of organic contaminant on δ^{18}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δ^{18}O和δD的影响. 中国生态农业学报, 20, 1359–1365.]

Nippert JB, Knapp AK (2007). Soil water partitioning contributes to species coexistence in tallgrass prairie. *Oikos,* 116, 1017–1029.

Peng HY (2011). *Spatial Pattern of Shrub Patches and Its Ecohydrological Mechanism at the Typical Steppe in Inner Mongolia*. PhD dissertation, Beijing Normal University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [彭海英 (2011). 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛空间分布格局及其生态水文机理. 博士学位论文, 北京师范大学, 北京.]

Peng HY, Li XY, Li GY, Zhang ZH, Zhang SY, Li L, Zhao GQ, Jiang ZY, Ma YJ (2013). Shrub encroachment with increasing anthropogenic disturbance in the semiarid Inner Mongolian grasslands of China. *Catena,* 109, 39–48.

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

Rose KL, Graham RC, Parker DR (2003). Water source utilization by *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula* on thin soils over bedrock. *Oecologia,* 134, 46–54.

Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophysical Monograph Series,* 78, 1–36.

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, 1861–1876.

Wang P, Song XF, Han DM, Zhang YH, Liu X (2010). A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: A case in Shanxi Province, China. *Agricultural Water Management,* 97, 475–482.

White JW, Cook ER, Lawrence JR, Wallace SB (1985). The DH ratios of sap in trees: Implications for water sources and tree ring DH ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* 49, 237–246.

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,* 28, 6265–6275.

Xiong XG, Han XG (2005). Spatial heterogeneity in soil carbon and nitrogen resources, caused by *Caragana microphylla*, in the thicketization of semiarid grassland, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica,* 25, 1678–1683. (in Chinese with English abstract) [熊小刚, 韩兴国 (2005). 内蒙古半干旱草原灌丛化过程中小叶锦鸡儿引起的土壤碳、氮资源空间异质性分布. 生态学报, 25, 1678–1683.]

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 HB, Chen JQ, Cheng XL, Liu SR, An SQ (2011).

Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: The deuterium isotope approach. *Ecohydrology,* 4, 236–244.

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

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

Zhang Z, Wang SP, Nyren P, Jiang GM (2006). Morphological and reproductive response of *Caragana microphylla* to different stocking rates. *Journal of Arid Environments,* 67, 671–677.

Zhou DW (1990). *Caragana microphylla* thicketization of grassland, Inner Mongolia. *Inner Mongolia Prataculture,* (3), 17–19. (in Chinese) [周道玮 (1990). 内蒙古小叶锦鸡儿灌丛化草地. 内蒙古草业, (3), 17–19.]

责任编委: 陈世苹　责任编辑: 李　敏