



ISSN 1005-264X
www.plant-ecology.com

植物生态学报

Chinese Journal of Plant Ecology

第41卷 第2期 2017年2月 Vol. 41 No. 2 February 2017



主办单位：中国科学院植物研究所
中国植物学会

Sponsors: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences
Botanical Society of China

黄土丘陵区典型天然灌丛和人工灌丛优势植物土壤水分利用策略

吕 婷¹ 赵西宁^{2,3*} 高晓东^{2,3} 潘燕辉⁴

¹西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ⁴兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘 要 细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)是黄土高原农地退耕后长期存在的天然植物群落优势种。柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)灌丛是黄土高原防治水土流失的主要人工群落类型。研究它们的水分利用策略对评价气候暖干化趋势下黄土高原生态建设可持续性具有重要意义。该研究以退耕7年的天然草地细裂叶莲蒿群落、退耕30年的天然草地细裂叶莲蒿群落和退耕30年的人工灌木林柠条锦鸡儿群落为研究对象, 采用氧稳定同位素比率($\delta^{18}\text{O}$)技术研究其对不同土层土壤水分利用的季节性变化, 通过MixSIR模型量化各土层土壤水分利用的贡献。结果表明: 在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 分布图上, 对黄土丘陵区降水样的氢稳定同位素比率(δD)和 $\delta^{18}\text{O}$ 回归分析得到当地的大气降水线, 土壤水和植物水中的氢氧稳定同位素组成在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 分布图上都位于当地大气降水线的右下方, 表明研究区土壤水分中的同位素组成受强烈蒸发影响发生了富集作用。随着季节变化, 退耕7年的天然草地细裂叶莲蒿和退耕30年的人工灌木林柠条锦鸡儿植物水分来源可在不同土层之间较为灵活地转换, 当浅层(0–40 cm)土壤水可利用时, 植物主要利用40 cm以上的土壤水分; 当浅层土壤干燥时, 主要吸收40–80 cm土层土壤的水分。退耕30年天然草地中细裂叶莲蒿主要依赖于0–10 cm表层土壤的水分。这表明在未来极端干旱事件发生频率增大的情况下, 退耕7年的天然草地细裂叶莲蒿和退耕30年的人工灌木林柠条锦鸡儿具有更大的生存优势, 而退耕30年的天然草地细裂叶莲蒿受干旱等极端天气影响更为严重。

关键词 氧稳定同位素; 水分来源; MixSIR模型; 细裂叶莲蒿; 柠条锦鸡儿

引用格式: 吕婷, 赵西宁, 高晓东, 潘燕辉 (2017). 黄土丘陵区典型天然灌丛和人工灌丛优势植物土壤水分利用策略. 植物生态学报, 41, 175–185. doi: 10.17521/cjpe.2016.0253

Soil water use strategy of dominant species in typical natural and planted shrubs in loess hilly region

LÜ Ting¹, ZHAO Xi-Ning^{2,3*}, GAO Xiao-Dong^{2,3}, and PAN Yan-Hui⁴

¹College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; and ⁴Key Laboratory of Western China's Environmental Systems of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract

Aims *Artemisia gmelinii* is a dominant specie naturally established after abandonment of cultivated lands in the Loess Plateau, and *Caragana korshinskii* is one of the main planted shrub species to control soil erosion. Improved understanding of water use strategies of these two species is of great significance to evaluate the sustainable development of the Loess Plateau under the trend of climate warming and increasing drought events.

Methods Stable oxygen-18 isotope was used to determine seasonal variations in the water sources of native *A. gmelinii* communities established after abandonment of cultivated lands for 7 and 30 years and planted *C. korshinskii* after 30 years. The contributions of soil water from different depths to water uptake were estimated by the MixSIR Bayesian mixing model. The geometric mean regression method was used to fit the line of precipitation to get the local meteoric water line (LWML).

Important findings The stable hydrogen isotope rate (δD) and stable oxygen isotope rate ($\delta^{18}\text{O}$) of soil water and xylem water plotted to the right side of the LWML, indicating that the isotopic compositions of soil water were enriched due to evaporation. The native *A. gmelinii* communities established after abandonment of cultivated

收稿日期Received: 2016-08-01 接受日期Accepted: 2016-12-25

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: xiningz@aliyun.com; zxsbs@gmail.com)

lands for 7 years and planted *C. korshinskii* after 30 years showed plasticity in switching water sources from different soil layers, extracting water from shallow soil (0–40 cm) when soil water was available, but deeper soil (40–80 cm) when shallow soil water was dry. In contrast, *A. gmelinii* growing in site after cultivation abandonment for 30 years mainly relied on water from the surface soil (0–10 cm) throughout the growing season. Our results suggest that the ability of *A. gmelinii* to compete for soil water reduces with aging of the community while the planted *C. korshinskii* will have competitive advantage under the condition of increasing frequency of drought events in the future.

Key words oxygen stable isotopes; water-use source; MixSIR model; *Artemisia gmelinii*; *Caragana korshinskii*

Citation: Lü T, Zhao XN, Gao XD, Pan YH (2017). Soil water use strategy of dominant species in typical natural and planted shrubs in loess hilly region. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 175–185. doi: 10.17521/cjpe.2016.0253

细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*), 俗称铁杆蒿或万年蒿, 为多年生半灌木草本植物, 是黄土丘陵区植被自然恢复过程中重要的植物群落优势种, 也是黄土丘陵沟壑区天然草地的主要建群种(周萍等, 2008)。柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)属豆科锦鸡儿属植物, 其适应性强, 根系极为发达, 是黄土丘陵区水土保持和生态防护首选的灌木(宁婷, 2014)。近期研究表明黄土高原气候朝暖干化趋势发展, 极端气候事件发生频率的增大引起了降水量减少和降水年内分配不均(张宝庆等, 2012), 这将导致黄土丘陵区水文循环过程发生变化。天然植被和人工植被是SPAC循环过程主要的调控者(赵文智和程国栋, 2001; 赵西宁等, 2005), 研究黄土丘陵区天然灌丛优势种细裂叶莲蒿和主要人工灌木柠条锦鸡儿的土壤水分利用策略对评价气候变化环境下该区域生态建设可持续性具有重要意义。

氢氧稳定同位素示踪技术是评估植物水分利用策略的一种有效和精确的手段(Ehleringer & Dawson, 1992)。研究表明, 植物根系在获取土壤水分及向木质部运输过程中不发生同位素分馏(Brunel *et al.*, 1995), 因此通过比较植物茎水与各潜在水源的氢氧稳定同位素值就可以确定植物的水分来源(Dawson *et al.*, 2002)。二源或三源线性混合模型可快速估算各水源对植物的贡献率, 当超过3个水分来源时, 二源或三源线性模型不能提供唯一解, 基于同位素质量平衡原理, Phillips和Gregg (2003)给出了IsoSource混合模型来确定多源贡献的范围, IsoSource混合模型在识别作物的水分来源方面得到了广泛应用(Wang *et al.*, 2010; 郑肖然等, 2015)。但是IsoSource模型没有融合来源的不确定性分析, 不能提供更严谨的模型估算。近几年来, 科学家们开发了基于贝叶斯统计的混合模型软件包MixSIR

(Moore & Semmens, 2008)。相比之下, 贝叶斯混合模型在量化植物水源上更具优势, 它可以集合所有可能的多种来源的同位素特征值及同位素数据的不确定度, 并能融合先验信息, 使模型估计更为严谨准确(Leng *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2015a, 2015b)。

本文主要研究目的是通过氧稳定同位素和MixSIR模型相结合的方法探讨黄土丘陵区典型天然灌丛细裂叶莲蒿(退耕7年和30年)和柠条锦鸡儿(退耕30年)的土壤水分利用策略。通过分析典型植物吸水深度的季节性变化, 探讨黄土高原丘陵植物的水分适应机制, 为黄土丘陵区退化生态系统的植被恢复、植物资源的有效利用提供决策依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点和物种

研究区位于陕西省清涧县店则沟镇园则沟小流域(37.23° N, 110.35° E)。该区为典型的黄土丘陵沟壑区, 具有显著的温带大陆性季风气候, 年平均气温8.6 °C, 月平均最低气温-6.5 °C (1月), 月平均最高气温22.8 °C (7月), 年降水量505 mm, 季节分配不均, 70%的降水集中在7–9月。土壤主要为黄绵土, 属于粉质壤土。研究区内不同土层土壤理化性质不同, 土壤颗粒均以粉粒为主(表1), 具有较强的入渗能力, 土壤总有机碳(TOC)和全氮(total N)含量在0–20 cm土层最高。植被组成简单, 群落郁闭度低, 分布稀疏, 以不同年限的细裂叶莲蒿(天然灌丛优势建群种)和柠条锦鸡儿(人工灌木林主要建群种)为主。

1.2 根系密度调查

2015年9月, 在细裂叶莲蒿和柠条锦鸡儿生长季后期, 利用根钻法(根钻直径90 mm), 以样本树干为中心, 每120°沿半径方向以0.5 m等间距设置取样点, 取样长度为1.5 m, 1.0 m深度内分土层(20 cm)

表1 不同土层的颗粒大小及土壤养分(平均值±标准偏差)

Table 1 Particle size distribution and major nutrients in different soil layers (mean ± SD)

土层 Soil layer (cm)	沙粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	总有机碳 Total organic carbon (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)
0–20	21.18 ± 3.12	67.41 ± 2.08	11.40 ± 1.08	2.49 ± 0.70	0.23 ± 0.05	0.93 ± 0.13
20–40	20.61 ± 6.84	67.42 ± 5.54	11.86 ± 1.47	2.25 ± 0.66	0.21 ± 0.04	0.98 ± 0.16
40–60	19.25 ± 4.96	69.03 ± 3.56	11.72 ± 1.41	2.03 ± 0.36	0.19 ± 0.07	0.90 ± 0.12

表2 试验区监测样地基本信息

Table 2 Information of monitoring plots in the experimental places

退耕年限 Years since cultivation abandonment (a)	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude (m)	优势物种 Dominant species	坡度 Slope (°)	坡向 Slope aspect	标准地规格 Plot size (m)
7	37.23° N, 110.35° E	1 059.0	细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	17°	阴坡 Shade slope	40 × 40
30	37.23° N, 110.35° E	1 048.9	细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	17°	阴坡 Shade slope	40 × 40
30	37.23° N, 110.35° E	1 094.8	柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>	18°	阴坡 Shade slope	40 × 40

钻取土样。把钻取的土样过16目筛后拣出全部根系,并将直径大于2 mm的粗根排除,冲洗并去除死根后进行扫描。将获取的细根密封,带回实验室于80℃烘干,称量获取细根干质量。各土层细根长度除以取样土体体积即为细裂叶莲蒿和柠条锦鸡儿所对应土层细根根长密度(FRLD)。

1.3 样品采集

2015年5月1日至9月30日,对每次降雨的起止时间、降雨量大小进行监测,并收集每次降雨样品。通过咨询当地农户,得知小流域内退耕草地年限分别为退耕7年(2008年退耕)和退耕30年(1985年左右退耕)。本研究分别在退耕7年的天然草地选取细裂叶莲蒿群落、退耕30年的天然草地选取细裂叶莲蒿群落和退耕30年的人工灌木林地选取柠条锦鸡儿群落(以下简称7年细裂叶莲蒿、30年细裂叶莲蒿和30年柠条锦鸡儿),并建立3块固定野外观测样地(表2),样地间最远直线距离在200 m之内。在2015年的5月19日、8月5日和25日、9月19日对植物和土壤样品同时间采样。但2015年5月19日未采集30年柠条锦鸡儿,因为持续干旱,柠条锦鸡儿样地土壤剖面水分抽提困难;8月25日在退耕7年草地采集土壤样品时,出现持续雷电天气,为安全起见放弃采样。每次采样时在样地内随机选择有代表性、长势良好的标准株4株,每株植物各采集3瓶作为重复。采样方法:剪取已经栓化、成熟的枝条(直径3–5 cm),除去枝条的外皮和韧皮部以避免同位素分馏(Liu *et al.*, 2014),保留木质部,迅速将样品放入10 mL塑料离心管中,用封口膜密封,放入冰盒保存,带回实验室迅速置于–20℃下冷冻,直至同位素测定。

在每株植物冠层下方用土钻法进行取样,取样深度为120 cm。0–40 cm土层每10 cm取样一份,40–80 cm土层每20 cm取样一份,80–120 cm土层取样一份,每层3个重复,将取得的每层土样混合均匀。各土层所取土壤样品分成两份,一份迅速装入样品瓶,用封口膜密封放入冰盒保存,带回实验室迅速置于–20℃下冷冻,直至同位素测定;另一份土样装入铝盒,带回实验室放入烘箱中,于105℃烘干至恒质量,测量土壤质量含水量。使用自动气象站(Automatic Weather Station AR5, Avolon Scientific, Jersey City, USA)长期监测气象数据,包括日降水量、日最高和最低气温、太阳辐射、风速和空气湿度等。

1.4 水分提取和样品分析

利用低温真空蒸馏法提取土壤水分和植物木质部水分。用稳定同位素红外光谱技术的液态水同位素分析仪(TIWA-45EP, Los Gatos Research, Mountain View, USA)测量样品的氢、氧稳定同位素比率(δD 、 $\delta^{18}O$):

$$\delta X(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1\,000 \quad (1)$$

式中X为元素名称; R_{sample} 为样品的重轻同位素比值; R_{standard} 为国际标准物质的重轻同位素比值。

δD 的测量精度为±0.5‰, $\delta^{18}O$ 的测量精度为±0.2‰。由于在低温真空蒸馏抽提过程中,提取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(孟宪菁等, 2012)。为了消除因甲醇和乙醇等污染带来的误差,植物木质部 $\delta^{18}O$ 用Los Gatos公司的光谱分析软件进行校正。水分提

取和样品分析分别在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院水同位素实验室和兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

1.5 数据分析

贝叶斯模型(MixSIR 1.0.4)广泛用来确定植物的吸水贡献(Moore & Semmens, 2008; Leng *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2015a, 2015b)。在本研究中不同土层的土壤水分被认为是细裂叶莲蒿和柠条锦鸡儿吸水的潜在来源, 因为该地区地下水埋深大(>50 m), 地下水可不作为植物的潜在水源。若土层水分来源过多, 来源贡献的范围和分布信息可能没有唯一解(Phillips & Gregg, 2003), 为了更直观方便地了解植物所利用的水源究竟来自哪层土壤, 我们将不同土层的土壤水分基于土壤水同位素组成在土层间以及月份间的变异、土壤含水量和根系分布对水源重新划分, 划分依据如下: (1)表层土壤水(0–10 cm)受蒸发富集和降雨入渗影响, 是氧同位素值波动幅度较大的土层。(2)中层土壤水(10–80 cm)氧同位素组成月份间变化相对缓和, 因为10–40 cm土壤含水量变化较大, 根系分布较多, 该层划分成10–40 cm和40–80 cm; (3)深层土壤水(80–120 cm)氧同位素值基本不随土壤深度的增加而变化, 月份间差异不显著, 土壤含水量随深度的增加变化很小。因此, 0–120 cm土壤剖面被划分为4个土层: 0–10 cm、10–40 cm、40–80 cm和80–120 cm。

有研究表明, 耐盐碱植物和干旱地带植物在根系吸水过程中, 氢稳定同位素可能会发生分馏, 而氧稳定同位素则不发生分馏(Ellsworth & Williams, 2007), 本研究采用氧稳定同位素进行水源预测, 把植物木质部和不同土层 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值、不同水源的标准偏差和同位素分馏值作为模型的输入项, $\delta^{18}\text{O}$ 的分馏因子设为0, 模型估计值用平均数表示。

采用Excel 2013 和SPSS 16.0 统计软件对数据进行整理分析, 用Origin 8.0 软件作图。

2 结果分析

2.1 降水 ^{18}O 同位素动态变化

2015年5–9月降水量、降水 $\delta^{18}\text{O}$ 及平均每日温度随时间的变化如图1所示。2015年研究区内5–9月总降水量为283.6 mm, 降水主要集中在8–9月, 占全年总降水量的70.9%, 且80%以上的降水事件降水量小于5 mm, 最大单次降水量为8月1日的61 mm。

降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -11.33‰ – -1.61‰ 范围内变化, 波动范围较大, 并呈现大降水事件同位素组成较贫化、小降水事件同位素富集的现象。

图2显示了土壤水分、植物茎水和降水的 δD – $\delta^{18}\text{O}$ 的线性相关关系。对黄土丘陵区降水样品的氢氧稳定同位素组成进行回归分析, 得到当地大气降水线(LMWL: $\delta\text{D} = 6.35\delta^{18}\text{O} + 4.85$, $R^2 = 0.866$, $p < 0.001$), 相对于全球降水线(Rozanski *et al.*, 1993)(GMWL: $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$), LMWL有较低的斜率和截距, 表明当地降水受蒸发影响, 这与黄土丘陵区延安降水线方程基本一致。在 δD – $\delta^{18}\text{O}$ 分布图上, 土壤水分线(SWL: $\delta\text{D} = 3.65\delta^{18}\text{O} - 34.57$, $R^2 = 0.658$, $p < 0.01$)基本绘制在当地降水线的右下方, 斜率和截距都显著低于降水线, 表明土壤水分经历了强烈的二次蒸发。植物茎水的 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均落在土壤水氢氧同位素分布区间, 表明了7年细裂叶莲蒿、30年细裂叶莲蒿和30年柠条锦鸡儿主要利用不同土层土壤水分, 并且利用深度存在明显差异。

2.2 土壤含水量和土壤水 ^{18}O 同位素分布

从图3中可以看出, 7年和30年细裂叶莲蒿土壤水分随降水的变化, 不同月份之间表现出相似的规律性, 5月为细裂叶莲蒿的生长初期, 由于采样之前有连续9天的无雨期, 导致表层土壤含水量低, 40–120 cm土层土壤水分高于0–40 cm土层土壤水分, 而到了细裂叶莲蒿生长旺盛期(8月初), 随着降雨量的增加, 0–40 cm土壤水分得以恢复至较高水平, 40 cm以下土层土壤水分急剧下降, 直至接近土壤凋萎湿度7%。到8月25日, 30年细裂叶莲蒿0–40 cm土层土壤含水率下降到7%, 而40–120 cm土层土壤水分基本不变。9月在细裂叶莲蒿生长后期, 在降水的影响下, 土壤水分含量迅速升高, 0–40 cm土层土壤水分恢复较快, 80–120 cm土层土壤水分仍然没有得到恢复。30年柠条锦鸡儿土壤水分的月变化类似于细裂叶莲蒿, 8月初的大降雨短期提高了0–40 cm土层的土壤水分, 随后在强烈的蒸散作用下土壤含水量逐渐减小, 9月份0–40 cm土层的土壤水分得到恢复, 8月份和9月份80–120 cm土层的土壤含水量维持在较低水平(5.78%), 均低于土壤凋萎湿度。

7年细裂叶莲蒿、30年细裂叶莲蒿和30年柠条锦鸡儿样地土壤水分 $\delta^{18}\text{O}$ 随采样时间和采样深度而变化(图3D、3E、3F)。0–10 cm土层 $\delta^{18}\text{O}$ 受近期贫化的降水同位素值和蒸发富集的影响而高度变化, 显著

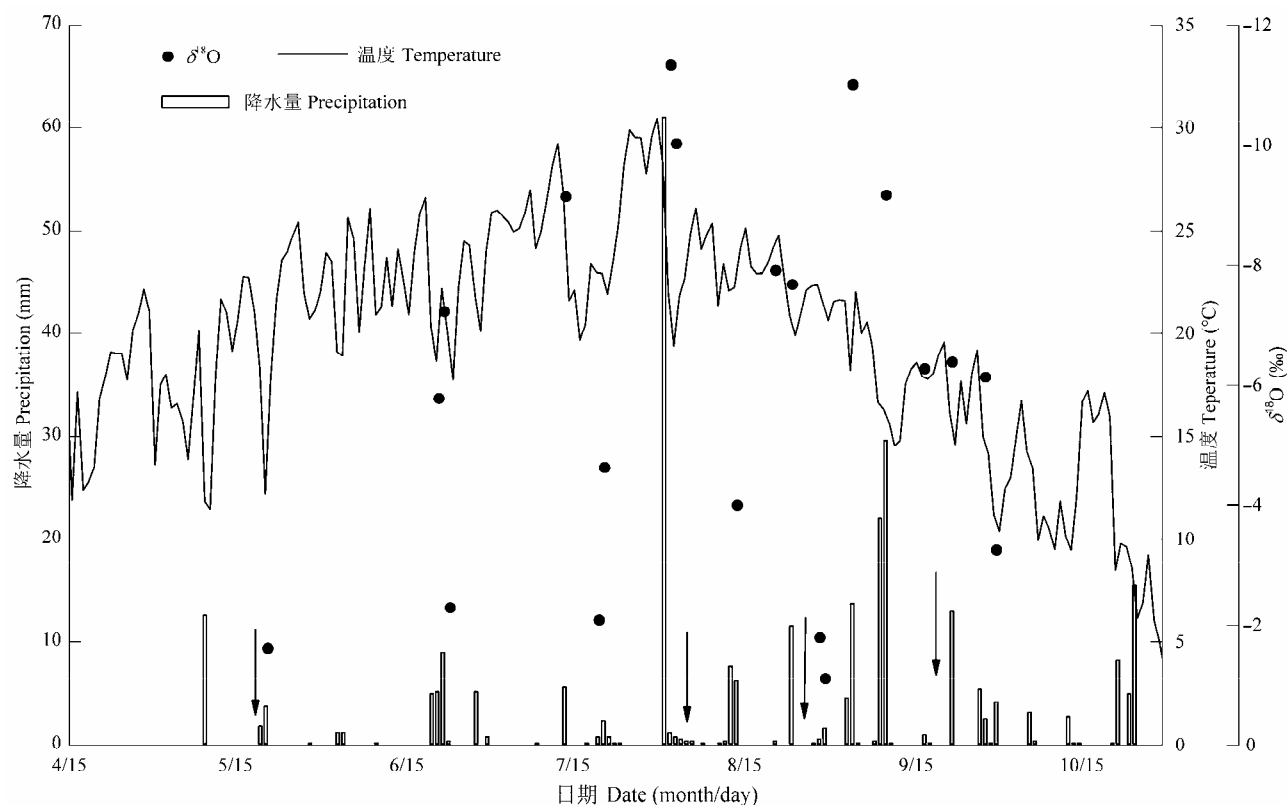


图1 2015年5–9月降水量、降水氧稳定同位素比率($\delta^{18}\text{O}$)值及平均每日温度变化。实心圆点代表 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值, 向下的箭头代表采样日期。

Fig. 1 Temporal variations of precipitation amount, isotopic compositions and daily temperature during May to September in 2015. The circles represent the means of stable oxygen isotope rate ($\delta^{18}\text{O}$), and the downward arrows represent sampling dates.

不同于其他土层($p < 0.01$)。与此相反, 除7年细裂叶莲蒿样地外, 30年细裂叶莲蒿和30年柠条锦鸡儿样地40 cm以下土层土壤水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 月份间无显著性差异(30年细裂叶莲蒿样地 $n = 4$, $F < 1.16$, $p > 0.112$; 柠条锦鸡儿样地 $n = 4$, $F < 5.419$, $p > 0.012$)。7年细裂叶莲蒿、30年细裂叶莲蒿和柠条锦鸡儿样地80 cm以下土壤水分同位素值相对一致, 分别为 -7.79‰ 、 -7.14‰ 和 -8.13‰ 。

2.3 植物茎 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素与土壤水分利用来源

图2显示所有植物木质部同位素值都分布在土壤水氢氧同位素值分布区间, 表明植物水源可能主要来源于不同土层的土壤水分。7年细裂叶莲蒿和30年柠条锦鸡儿的木质部同位素值主要在0–10 cm、10–40 cm和40–80 cm土层土壤水同位素值区间波动, 而30年细裂叶莲蒿木质部同位素值几乎分布在0–10 cm土层土壤水同位素值周围。植物种类、采样时间和植物种类 \times 采样时间的交互作用对木质部同位素值均有显著影响($p < 0.01$)。从表3可以看到, 不同植物木质部同位素在相同采样日期, 同一植物木

质部同位素值在不同采样日期差异显著, 30年细裂叶莲蒿木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于30年柠条锦鸡儿, 表明它吸收更多的表层土壤水。

用MixSIR模型计算植物对不同水分来源(0–10 cm、10–40 cm、40–80 cm和80–120 cm土层)的吸水比例, 从图4可以看出, 不同植物的吸水比例随生长进程显示出季节性差异。7年细裂叶莲蒿的吸水模式表现出很强的可塑性, 水源由生长初期(5月19日)的40–80 cm转移到生长中期(8月5日)的0–10 cm, 生长末期(9月19日)再次吸收40–80 cm土层的水分, 吸水比例高达88.0%。与7年细裂叶莲蒿相反, 30年细裂叶莲蒿在整个生长季节主要吸收0–10 cm土层的土壤水分。

30年柠条锦鸡儿的吸水模式也表现出很强的可塑性, 随着季节变化柠条锦鸡儿对不同深度土层土壤水分利用比例存在差异。8月5日对10–40 cm土层土壤水分吸收比例达63.9%, 8月25日主要利用0–10 cm土层的土壤水分, 9月19日主要利用40–80 cm土层的土壤水分, 利用比例为60.9%。

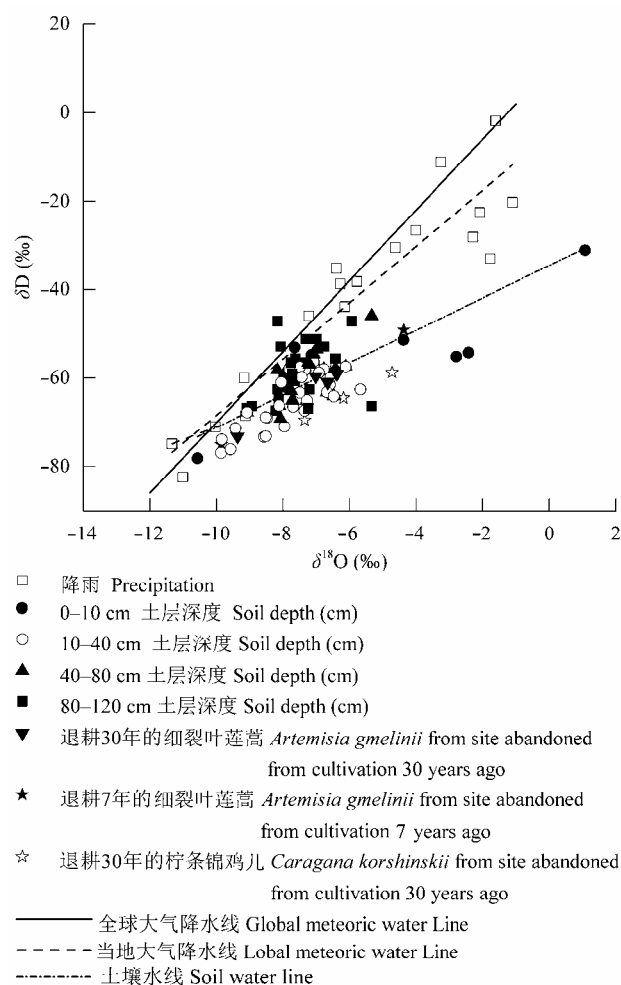


图2 2015年研究区大气降水(空心正方形)、土壤水分和植物水的 δD - $\delta^{18}O$ 的关系。当地大气降水线用虚线表示, 土壤水线用短点划线表示。 $\delta^{18}O$, 氧稳定同位素比率; δD , 氢稳定同位素比率。

Fig. 2 Values of δD as a function of $\delta^{18}O$ for precipitation (open square), soil water and xylem water in 2015 at the experimental site. The local precipitation line is indicated by a dashed line, soil water line is indicated by a short dash-dotted line. $\delta^{18}O$, stable oxygen isotope rate; δD , stable hydrogen isotope rate.

3 讨论

土壤水分 $\delta^{18}O$ 主要受降水、蒸发等因素的影响(尹力等, 2012)。表层(0–10 cm)土壤水分和 $\delta^{18}O$ 能敏感地响应降水量的变化, 并受蒸发影响显著。强烈的蒸发作用通常发生在表层, 这意味着表层土壤含水量低且 $\delta^{18}O$ 较高, 这与我们8月份表层土壤含水量高及同位素值较低的结果相反, 其直接受近期降雨中偏负同位素组成影响。相反, 在80–120 cm土层土壤含水量和同位素组成变化相对较小并逐渐趋于稳定(图3), 这是由于降水和蒸发作用随土壤深度的

增加逐渐减弱, 这和以往研究结果(周海等, 2013; Dai *et al.*, 2015)相一致。与此相似, 宁夏盐池北部紫苜蓿(*Medicago sativa*)试验地也发现不同层次土壤水 $\delta^{18}O$ 变异幅度不同, 随着土层增加, 变异程度减小并趋于稳定(朱林等, 2014)。

在本研究中植物木质部同位素值表现出季节性差异, 表明植物在整个生长季节吸收不同土层的土壤水分(表3), 水分运移满足降水—土壤水—木质部水的转化途径。植物的根系形态和根系分布决定植物吸水的潜在区域(徐贵青和李彦, 2009), 如生长在川西亚高山森林生态系统的糙皮桦(*Betula utilis*)和冷箭竹(*Bashania fangiana*)的吸水区域与土壤剖面的细根分布相一致(Xu *et al.*, 2011), 鄂尔多斯沙漠的浅根珍稀植物主要依靠降雨(Chen *et al.*, 2017)。实地调查发现细裂叶莲蒿水平根系相当发达, 且大部分细根分布于地表0–60 cm土层之中, 柠条锦鸡儿大部分细根分布于地表0–40 cm土层之中(图5)。在雨季, 当浅层水可利用时, 植物主要依靠浅根获取上层剖面的土壤水分, 很少依赖于深层土壤水分(陈小丽等, 2014; 戴岳等, 2014)。但植物不仅仅依赖降雨补充的浅层土壤水分, 研究表明干旱区土壤水分具有较强的异质性(高晓东, 2013), 植物会扎根在深层土壤来响应根区土壤水分的异质性, 这些深根对生态系统的水通量意义重大, 尤其当浅层土壤干燥时, 植物会从更深层获得土壤水分, 促使植物气孔开放, 延长在旱季的生长(Zhou *et al.*, 2015)。7年细裂叶莲蒿在不同生长时期可灵活地转换水源, 生长前期(5月19日)降水量少, 表层土壤含水量较低, 它主要通过主根获得71.4%的40–80 cm土层土壤水; 生长中期(8月5日), 在一场大降雨事件后, 迅速吸收降雨补充的0–40 cm土层的水分; 生长后期(9月19日), 进入秋季, 浅层土壤储水量小, 水供应不足, 又转而吸收40–80 cm土层的土壤水, 这和土壤储水量高值区高度吻合。同样, 30年柠条锦鸡儿在大降雨之后, 大幅度吸收10–40 cm土层的土壤水分; 表层干旱时(8月25日), 仍吸收0–10 cm土层的土壤水分, 这可能是由于柠条锦鸡儿根系具有“水力提升”功能, 它可以将深层土壤水由根系提升至浅层, 供植物浅层根系吸收利用。此外, Yang等(2015b)发现水分亏缺对随后植物吸水及生理活性的影响存在时间滞后效应。因此也有可能是柠条锦鸡儿在利用不同水源时存在时间滞后效应。但我们的采样数据还不

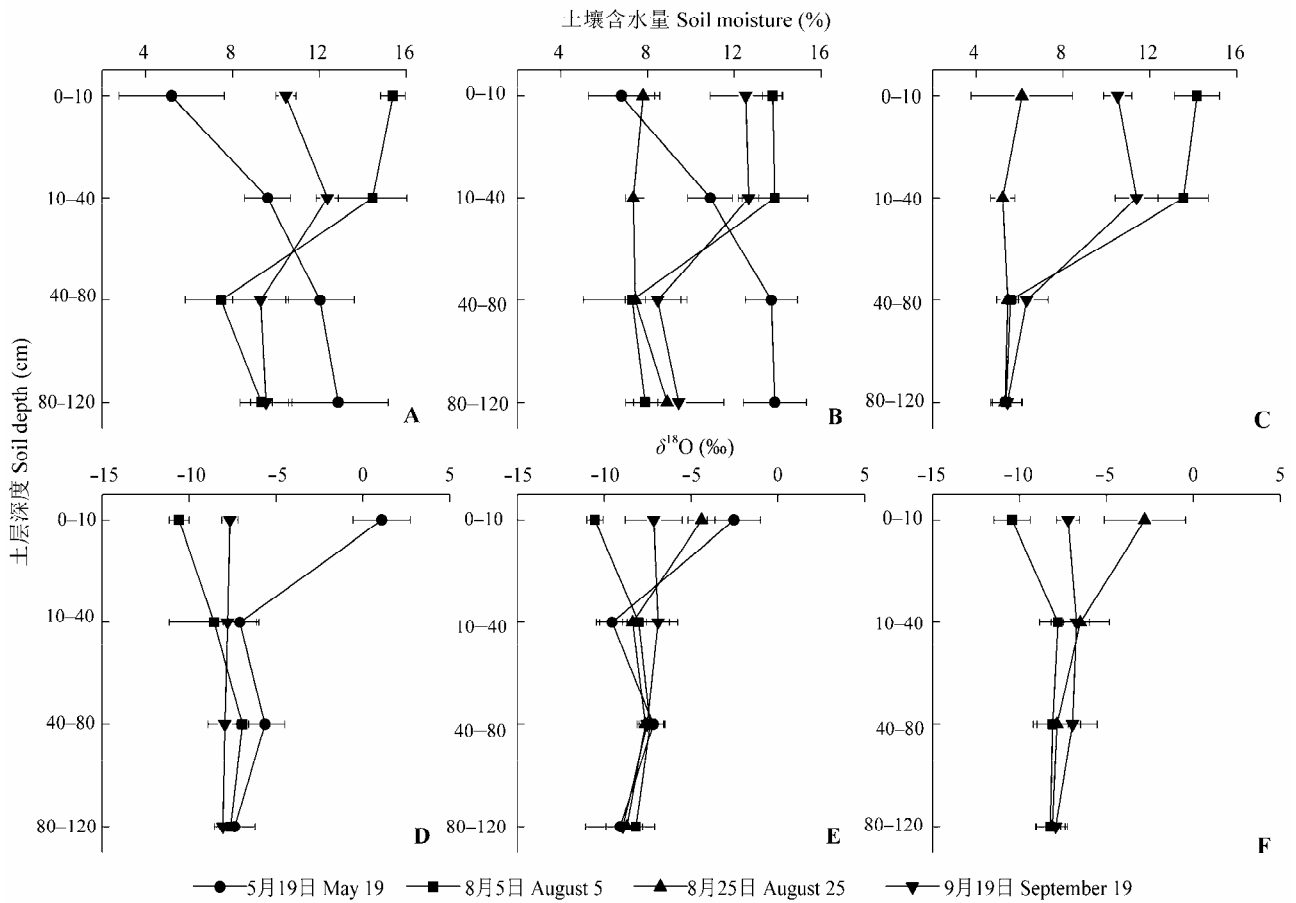


图3 不同深度土壤质量含水量和土壤水分的氧稳定同位素比率($\delta^{18}\text{O}$) (平均值 \pm 标准误差, $n = 4$)。A、D, 退耕7年的细裂叶莲蒿。B、E, 退耕30年的细裂叶莲蒿。C、F, 退耕30年的柠条锦鸡儿。
Fig. 3 Soil water content and stable oxygen isotope rate ($\delta^{18}\text{O}$) of soil water at different depths (mean \pm SE, $n = 4$). A, D, *Artemisia gmelinii* from site abandoned from cultivation 7 years ago. B, E, *Artemisia gmelinii* from site abandoned from cultivation 30 years ago. C, F, *Caragana korshinskii* from site abandoned from cultivation 30 years ago.

表3 退耕7年的细裂叶莲蒿、退耕30年的细裂叶莲蒿和退耕30年的柠条锦鸡儿在不同采样日期内木质部氧稳定同位素比率($\delta^{18}\text{O}$) (平均值 \pm 标准偏差)
Table 3 Stable oxygen isotope rate ($\delta^{18}\text{O}$) of plant xylem values for the five sample collection periods for *Artemisia gmelinii* from site abandoned from cultivation 7 years ago, *Artemisia gmelinii* and planted *Caragana korshinskii* from site abandoned from cultivation 30 years ago (mean \pm SD)

植物种类(退耕年限)	采样时间 Sample date			
Plant species (years since cultivation abandonment)	2015-5-19	2015-8-5	2015-8-25	2015-9-19
细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> (7 a)	-4.37 \pm 1.84 ^{aA}	-9.85 \pm 0.97 ^{aB}	—	-8.00 \pm 1.60 ^{aC}
细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> (30 a)	-6.39 \pm 1.11 ^{bA}	-9.37 \pm 0.49 ^{aB}	-6.65 \pm 0.44 ^{aA}	-7.02 \pm 1.01 ^{abA}
柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i> (30 a)	—	-7.35 \pm 0.59 ^{bA}	-4.71 \pm 0.67 ^{bB}	-6.18 \pm 0.70 ^{bC}

不同大写字母代表相同植物种类在不同采样日期的显著性差异(样本数组只有两个时进行独立样本 t 检验, 样本数量 >2 时, 进行LSD两两比较), 不同小写字母代表不同植物种类在同一采样日期的显著性差异。

Different uppercase letters represent significant level of the same species among the different sampling dates (independent-sample t -test and LSD- t are used to test). Different lowercase letters represent significant level of different species within the same sampling date.

能提供足够的信息来反映灌木水源转移和生理活动之间的关系。

30年细裂叶莲蒿主要依赖0–10 cm土层的土壤水分。一般来说当浅层水可用时, 植物主要利用浅层水使能量消耗最低。虽然一些木本植物有功能性二态根系, 但它们还主要依靠存储在上层土壤的水,

不表现出水源的转换特征(Dai *et al.*, 2015)。30年细裂叶莲蒿可通过错综复杂的浅根系统探索广阔的水平区域以补偿低浅层含水量, 同时养分含量在表层最高(表1), 对浅层土壤水分的利用也有利于养分吸收。这有可能是由于在我们研究期间干旱条件不够极端, 不足以引起稀缺水资源的重大竞争, 需要30

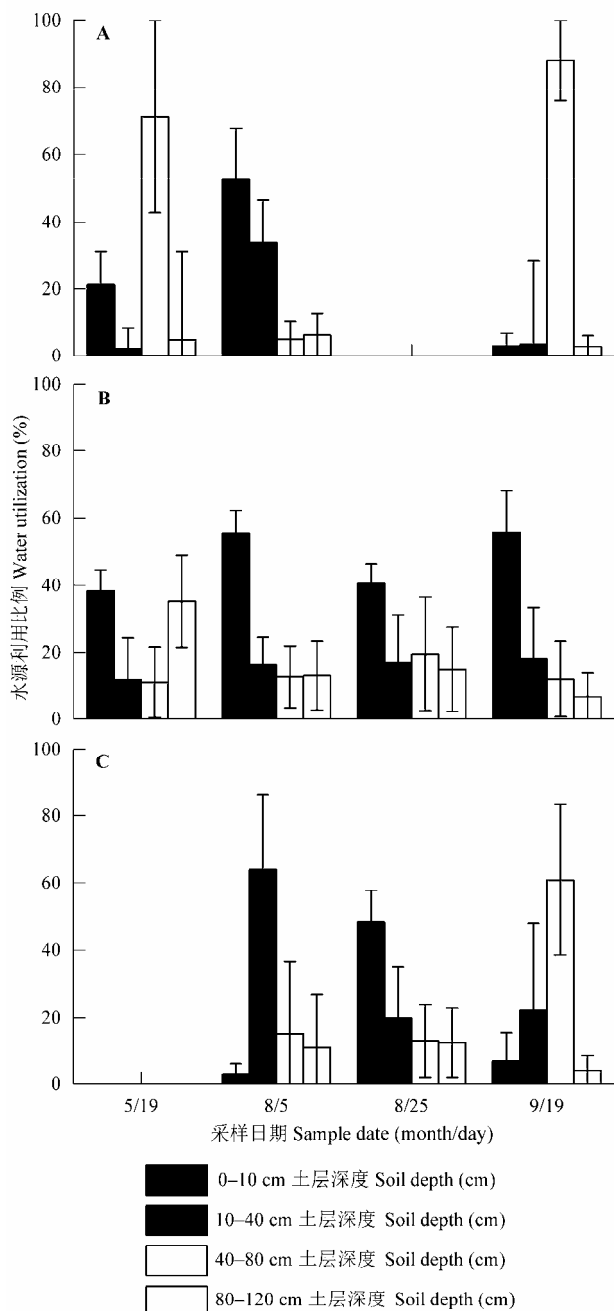


图4 不同植物对4个潜在水源利用比例的季节变化(平均值 \pm 标准偏差)。A, 退耕7年的细裂叶莲蒿。B, 退耕30年的细裂叶莲蒿。C, 退耕30年的柠条锦鸡儿。

Fig. 4 Seasonal variations in fraction of uptake from four potential soil water sources for different plants (mean \pm SD). A, *Artemisia gmelinii* from site abandoned from cultivation 7 years ago. B, *Artemisia gmelinii* from site abandoned from cultivation 30 years ago. C, *Caragana korshinskii* from site abandoned from cultivation 30 years ago.

年细裂叶莲蒿从更深土层吸收土壤水分(Asbjornsen *et al.*, 2008)。7年细裂叶莲蒿和30年细裂叶莲蒿的吸水模式不同,可能是由于7年细裂叶莲蒿重建年限短,根系横向和纵向发展不够导致的。此外,细裂叶

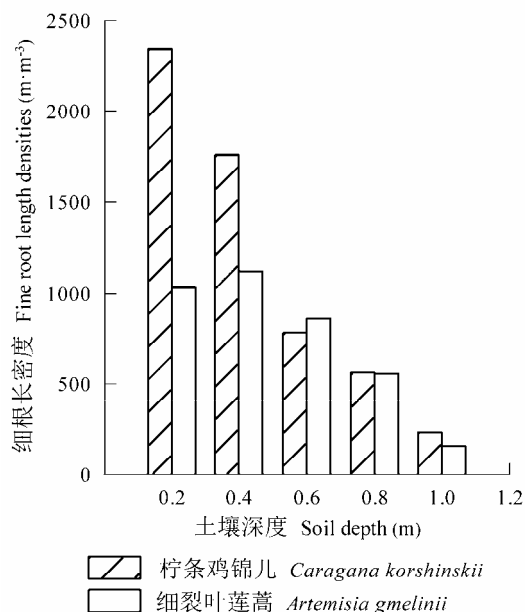


图5 细裂叶莲蒿和柠条锦鸡儿细根根长密度随着土层深度的变化特征。

Fig. 5 Vertical distribution of fine root length density with *Artemisia gmelinii* and *Caragana korshinskii*.

莲蒿可能有其他的耐旱自适应机制不直接与吸水深度可塑性有关,如长期干旱后短期施水,细裂叶莲蒿的叶水势和光化学特性迅速得到恢复(胡相明等, 2006),且植物能通过提高自身的水分利用效率来应对干旱胁迫(蔡马等, 2012)。

已有研究表明,荒漠化草原未来降水格局变化加之人为干扰(如过度放牧),可能会显著改变植物群落结构,加速西北地区草原的退化速率(Cheng *et al.*, 2006)。在全球暖化的背景下,黄土高原气候将呈现出显著的暖干化趋势(张宝庆, 2014),黄土高原的水资源短缺态势将进一步加剧,从而影响黄土丘陵区植被恢复。退耕7年的天然草地细裂叶莲蒿和退耕30年的人工灌木林柠条锦鸡儿的用水策略反映了它们有二态根系,可调整土壤水分利用深度,这种柔性水分利用策略更有利于植物应对黄土高原未来气候变化造成的降水量和降水频率变化,增大植物的存活概率。但是随着退耕年限增加,细裂叶莲蒿水分利用来源发生明显变化。本研究表明退耕30年的天然草地细裂叶莲蒿在不同时期主要利用表层土壤水分,对降雨反应不敏感。黄土高原地区气候暖干化可能导致降水量减少和蒸散发强度加剧,这种变化对表层土壤水影响最为显著,导致表层土壤含水量降低,进而将增大退耕30年的天然草地细裂叶莲蒿

群落种内水分竞争, 造成群落衰退和密度降低。

4 结论

本研究通过氧稳定同位素和MixSIR模型相结合的方法探讨黄土丘陵区典型天然灌丛细裂叶莲蒿(退耕7年和30年)和柠条锦鸡儿(退耕30年)的植物水分利用策略。研究发现, 随着季节变化, 退耕7年的天然草地细裂叶莲蒿和退耕30年的人工灌木林柠条锦鸡儿可灵活地转换水源, 当浅层(0–40 cm)土壤水可利用时, 植物主要利用40 cm以上的土壤水分, 当浅层土壤干燥时, 主要吸收40–80 cm土层土壤的水分。根系吸水功能具有较强的可塑性, 有利于应对干旱胁迫, 人工种植柠条锦鸡儿30年后并没有发生明显退化现象, 表明柠条锦鸡儿在黄土丘陵区可以维持较长时间稳定发展; 而退耕30年的天然草地细裂叶莲蒿主要依赖于0–10 cm土层的土壤水分, 随着退耕年限的增长, 细裂叶莲蒿更依赖于降雨补充的表层土壤水分。

细裂叶莲蒿和柠条锦鸡儿的吸水策略均反映了对干旱环境的高耐受性, 研究黄土丘陵区天然植被和人工灌木吸水模式的季节性变化将为生态系统的可持续发展提供借鉴, 但预测降水格局的改变以及人为扰动对群落的连续性演替及植被群落结构的影响, 还需要结合不同水文环境中细裂叶莲蒿与共生草本植物水分竞争关系的进一步研究。

参考文献

- Asbjornsen H, Shepherd G, Helmers M, Mora G (2008). Seasonal patterns in depth of water uptake under contrasting annual and perennial systems in the corn belt region of the midwestern US. *Plant and Soil*, 308, 69–92.
- Brunel JP, Walker GR, Kennett-Smith AK (1995). Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 167, 351–368.
- Cai M, Han RL, Jin SJ, Guo Y, Liang ZS (2012). Effect of drought on growth and water consumption of two subshrub species in Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University*, 27, 26–32. (in Chinese with English abstract) [蔡马, 韩蕊莲, 靳淑静, 郭颖, 梁宗锁 (2012). 土壤干旱对黄土高原2种半灌木植物生长与耗水规律的影响. 西北林学院学报, 27, 26–32.]
- Chen J, Xu Q, Gao DQ, Song AY, Hao YG, Ma YB (2017). Differential water use strategies among selected rare and endangered species in West Ordos Desert of China. *Journal of Plant Ecology*, 10, in press. doi: 10.1093/jpe/rtw-059.
- Chen XL, Chen YN, Chen YP (2014). Relationship among water use of different plants in Heihe River riparian forests. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 22, 927–979. (in Chinese with English abstract) [陈小丽, 陈亚宁, 陈亚鹏 (2014). 黑河下游荒漠河岸林植物水分利用关系研究. 中国生态农业学报, 22, 972–979.]
- Cheng XL, An SQ, Li B, Chen GQ, 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.
- 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.]
- Dai Y, Zheng XJ, Tang LS, Li Y (2015). Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantünggüt Desert. *Plant and Soil*, 389, 73–87.
- Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, Templer P, Tu KP (2002). Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 507–559.
- Ehleringer JR, Dawson TE (1992). Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 15, 1073–1082.
- Ellsworth PZ, Williams DG (2007). Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant and Soil*, 291, 93–107.
- Gao XD (2013). *Catchment-Scale Available Soil Moisture Spatial-Temporal Variability in the Hilly Areas of the Loess Plateau*. PhD dissertation, Graduate University of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Yangling, Shaanxi. 35–64. (in Chinese with English abstract) [高晓东 (2013). 黄土丘陵区小流域土壤有效水时空变异与动态模拟研究. 博士学位论文, 中国科学院研究生院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌. 35–64.]
- Hu XM, Chen JM, Wan HE, Zhao YY, Xu XB, Gu XJ, Li WJ (2006). Effect of short-term watering on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of *Artemisia sacrorum* under long-term drought. *Acta Agrestia Sinica*, 14, 236–241. (in Chinese with English abstract) [胡相明, 程积民, 万惠娥, 赵艳云, 徐宣斌, 古晓林, 李维军 (2006). 短期施水对长期干旱细裂叶莲蒿光合作用和叶绿素荧光特征的影响. 草地学报, 14, 236–241.]

doi: 10.17521/cjpe.2016.0253

- Leng X, Cui J, Zhang S, Zhang W, Liu Y, Liu S, An S (2013). Differential water uptake among plant species in humid alpine meadows. *Journal of Vegetation Science*, 24, 138–147.
- Liu W, Wang P, Li J, Liu W, Li H (2014). Plasticity of source water acquisition in epiphytic, transitional and terrestrial growth phases of *Ficus tinctoria*. *Ecohydrology*, 7, 1524–1533.
- 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.]
- Moore JW, Semmens BX (2008). Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. *Ecology Letters*, 11, 470–480.
- Ning T (2014). *Study on Suitable Initial Planting Density of Caragana korshinskii Plantation in Semi-Arid Loess Hilly Region*. PhD dissertation, Graduate University of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Yangling, Shaanxi. 1–9. (in Chinese with English abstract) [宁婷 (2014). 半干旱黄土丘陵区人工柠条锦鸡儿林合理初植密度研究. 博士学位论文, 中国科学院研究生院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌. 1–9.]
- Phillips DL, Gregg JW (2003). Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources. *Oecologia*, 136, 261–269.
- Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records*, 78, 1–36.
- Wang P, Song X, Han D, Zhang Y, 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.
- Xu GQ, Li Y (2009). Roots distribution of three desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 130–137. (in Chinese with English abstract) [徐贵青, 李彦 (2009). 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应. 生态学报, 29, 130–137.]
- 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 B, Wen X, Sun X (2015a). Irrigation depth far exceeds water uptake depth in an oasis cropland in the middle reaches of Heihe River Basin. *Scientific Reports*, 5, 12506. doi: 10.1038/srep15206.
- Yang B, Wen X, Sun X (2015b). Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 218–228.
- Yin L, Zhao LJ, Ruan YF, Xiao HL, Cheng GD, Zhou MX, Wang F, Li CZ (2012). Study of the replenishment sources of typical ecosystems water and dominant plant water in the lower reaches of the Heihe, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34, 1478–1486. (in Chinese with English abstract) [尹力, 赵良菊, 阮云峰, 肖洪浪, 程国栋, 周茅先, 王芳, 李彩芝 (2012). 黑河下游典型生态系统水分补给源及优势植物水分来源研究. 冰川冻土, 34, 1478–1486.]
- Zhang BQ (2014). *Study on Spatiotemporal Variability of Drought and Rainwater Harvesting Potential on the Chinese Loess Plateau*. PhD dissertation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. 106–111. (in Chinese with English abstract) [张宝庆 (2014). 黄土高原干旱时空变异及雨水资源化潜力研究. 博士学位论文, 西北农林科技大学, 陕西杨凌. 106–111.]
- Zhang BQ, Wu PT, Zhao XN, Gao XD (2012). Study on regional drought assessment based on variable infiltration capacity model and palmer drought severity index. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43, 926–934. (in Chinese with English abstract) [张宝庆, 吴普特, 赵西宁, 高晓东 (2012). 基于可变下渗容量模型和Palmer干旱指数的区域干旱化评价研究. 水利学报, 43, 926–934.]
- Zhao WZ, Cheng GD (2001). Comments on a number of issues of eco-hydrological processes in arid areas. *Chinese Science Bulletin*, 46, 1851–1857. (in Chinese with English abstract) [赵文智, 程国栋 (2001). 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. 科学通报, 46, 1851–1857.]
- Zhao XN, Wu PT, Wang WZ, Feng H (2005). Research advance on eco-environmental water requirement. *Advances in Water Science*, 16, 617–622. (in Chinese with English abstract) [赵西宁, 吴普特, 王万忠, 冯浩 (2005). 生态环境需水研究进展. 水科学进展, 16, 617–622.]
- 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. (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, Zhao W, Zheng X, Li S (2015). Root distribution of

- Nitraria sibirica* with seasonally varying water sources in a desert habitat. *Journal of Plant Research*, 128, 613–622.
- 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 P, Liu GB, Hou XL (2008). Study on vegetation and soil nutrient characters of *Artemisia sacrorum* communities in hilly-gully region of the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 17, 9–18. (in Chinese with English abstract) [周萍, 刘国彬, 侯喜禄 (2008). 黄土丘陵区铁杆蒿群落植被特性及土壤养分特征研究. 草业学报, 17, 9–18]
- Zhu L, Qi YS, Xu X (2014). Water sources of *Medicago sativa* grown in different slope positions in Yanchi County of Ningxia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 1226–1240. (in Chinese with English abstract) [朱林, 祁亚淑, 许兴 (2014). 宁夏盐池不同坡位旱地紫苜蓿水分来源. 植物生态学报, 38, 1226–1240.]
- 责任编辑: 程晓莉 责任编辑: 王 威



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览