

[编者按] 稳定同位素是天然存在于生物体内、不具有放射性的一类同位素。稳定同位素不仅可以示踪元素或化合物的来源、组成、分布和去向等,也具有整合和指示等多项功能,因此在生态学研究受到越来越多的关注。随着稳定同位素检测技术的不断发展,稳定同位素技术已经在不同空间尺度上(从细胞到植物/动物群落、生态系统、区域乃至全球)和时间尺度上(从数秒到几十万年)得到了广泛应用,成为了解生态学过程及其对全球变化的响应、生物与其生存环境相互关系、农产品追踪和检测、大气污染来源等诸多问题的强有力的工具。

为了给从事相关研究的科研工作者提供一个交流的平台,促进稳定同位素生态学研究的发展,本刊于2016年11月面向国内外稳定同位素生态学研究领域的专家学者及研究生广泛征稿。征稿函发出后,各相关单位踊跃投稿,共收到来自中国科学院、中国林业科学研究院、中国农业科学院、中国水产科学研究院、北京林业大学、上海海洋大学、山东农业大学、浙江大学等40余家单位来稿共计60余篇,研究内容涵盖森林、农田、海洋、草地、荒漠等主要生态系统。本期择优选出40篇稿件以专刊形式刊发,包括林分水分来源解析、农作物肥料动态、全球变化下温室气体溯源、植物-土壤碳氮循环追踪、水生动物食物来源和食物网构建等稳定同位素应用的最新研究报告和研究进展。

特别感谢清华大学深圳研究生院林光辉教授及其团队在组稿过程中给予的大力帮助!感谢中国科学院沈阳应用生态研究所方运霆、白娥、刘志民、何红波研究员对本专刊的大力支持!

## 两种荒漠生境条件下泡泡刺水分来源及其对降水的响应

周海 赵文智\* 何志斌

(中国科学院西北生态环境资源研究院/中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室,兰州 730000)

**摘要** 泡泡刺通常以灌丛沙堆的形式存在,具有很强的生态适应性,在防风固沙、抗旱耐盐等方面具有独特的功能,但是水分条件仍然是限制其生存和发展的关键因素。为了明确泡泡刺在不同荒漠生境条件下的水分利用策略,研究了河西走廊临泽绿洲边缘沙质和砾质生境下泡泡刺的水分来源季节动态特征以及对不同降雨事件的响应程度。测定了两种生境下泡泡刺茎水和不同水源(降水、土壤水和地下水)的氧稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )值,结合 IsoSource 模型计算了不同水源对泡泡刺水分来源的贡献比例。结果表明:两种生境下泡泡刺茎水  $\delta^{18}\text{O}$  值及其水分来源都存在显著的季节变化特征,沙质生境下泡泡刺在降水较少的春季和秋季主要利用地下水,其贡献率可达 50% 以上;而砾质生境下的泡泡刺无法利用深达 11.5 m 地下水,其水分来源受降水控制,具有较大的季节变异性。两种生境下的泡泡刺对降水响应显著,但是降水过后,随着土壤含水量的快速减小,沙质生境下的泡泡刺转而以丰富的地下水为主要水分来源,而砾质生境下的泡泡刺只能利用降水入渗至较深层土壤的较少水分。因此,两种生境下泡泡刺不同的水分利用策略是导致其生长特征差异的主要原因,同时也表明泡泡刺具有较强的自我调节和适应能力。

**关键词** 荒漠生境;降水变化;稳定同位素;水分来源;泡泡刺

本文由国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429903)和中国博士后科学基金项目(2016M602902)资助 This work was supported by the National Key Basic Research Development Program of China (2013CB429903) and China Postdoctoral Science Foundation (2016M602902).

2017-02-27 Received, 2017-05-03 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn

**Water sources of *Nitraria sibirica* and response to precipitation in two desert habitats.** ZHOU Hai, ZHAO Wen-zhi\*, HE Zhi-bin (Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences/Linze Inland River Basin Research Station of Chinese Ecosystem Research Network/Laboratory of Heihe River Eco-Hydrology and Basin Science, Lanzhou 730000, China).

**Abstract:** *Nitraria sibirica* usually exists in a form of nebkhas, and has strong ecological adaptability. The plant species has distinctive function for wind prevention and sand fixation, and resistance drought and salt. However, the water condition is still a limiting factor for the plant survival and development. In order to understand the water use strategy of the plant in different desert habitats, we selected the *N. sibirica* growing in sandy desert habitat and gravel desert habitat to study the seasonal variation of plant water sources and response to precipitation at the edge of the oasis of Linze in the Hexi Corridor. We measured the oxygen stable isotope of the plant stem water and the different potential water sources (precipitation, soil water and ground water), and used the IsoSource model to calculate the proportion of water sources from the potential water. The results showed that there were significant seasonal variation characteristics of  $\delta^{18}\text{O}$  value and water source of stem water for the plant in the two habitats. In the sandy habitat, the plant used more ground water in the less precipitation seasons including spring and fall, and more than 50% of the water sources absorbed from ground water. However, under the condition of gravel habitat, the plant could not achieve the ground water level depth of 11.5 m, and its water source was controlled by precipitation, which had large seasonal variability. The water sources of *N. sibirica* had significant responses to the change of precipitation in the two desert habitats. Following the rapid decrease of soil water content after the precipitation events, the plant in the sandy habitat turned to use the abundant ground water as the main sources of water, while the plant in the gravel habitat only used the less water from precipitation infiltration to the deep soil. Therefore, different water use strategies of the plant in the two habitats were the main reason for the difference in growth characteristics, and it had a strong ability of self-adjustment and adaptation.

**Key words:** desert habitat; precipitation variation; stable isotope; water source; *Nitraria sibirica*.

荒漠区降水偏少,且具有较大的变异性,但每一次降水事件的发生所引起的短期水资源的富集会对荒漠植物水分的来源产生不同程度的扰动作用<sup>[1-2]</sup>.一年生草本植物大多发育浅根系,通常利用由降水补给的表层土壤水分,其生长和发育受降水的控制,而多年生深根系植物主要利用深层土壤水或地下水,对降水响应不显著<sup>[3-4]</sup>.植物吸收和利用水分的模式决定了生态系统对环境水分的响应<sup>[5-6]</sup>,而生态系统对降水的响应存在临界性、等级性和滞后性,小降水只能导致较浅的降水入渗,而大降水事件通常能导致较深的降水入渗,所引起的不同植被水分来源动态响应的降水量级有所不同<sup>[7-8]</sup>.荒漠区降水格局的变化势必会引起植物的水源发生变化,通过研究不同生境条件下植物水分来源的变化规律可分析荒漠区植物在不同生境条件下的自我调节和适应能力.

仅靠传统的方法已无法满足日趋复杂和精细化生态学问题的解决,稳定同位素技术在植物水分来源中的应用日趋成熟,被认为是对植物和土壤破坏性较低而精确度较高的方法,尤其在环境脆弱、植被

稀疏的荒漠地区得到广泛应用<sup>[2,9]</sup>.Huang等<sup>[10]</sup>认为植物根系分布特征是影响植物对特定区域水分吸收和利用的关键.然而,研究发现,很多植物的根系可以遍布整个土壤剖面,但并不意味着所有的根系都能在其存在的土壤中表现出吸收水分的功能<sup>[11]</sup>.事实上,仅依靠根系的分布特征很难判断出植物真实的吸水区域,而利用氢氧稳定同位素技术可以证实土壤中植物根系吸水最活跃的区域<sup>[12-13]</sup>,并且可以反映不同时空尺度上植物的水分利用过程及其对水分变化的响应<sup>[14]</sup>.植物根系吸收的水分,通过茎木质部运输到未栓化的幼嫩枝条或者叶片之前一般不发生氢氧同位素分馏<sup>[13]</sup>,是稳定同位素技术应用于确定植物水分来源的理论基础.

河西走廊中部临泽绿洲边缘有大面积泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)群落分布,对保护当地绿洲农田免受风沙侵害有着至关重要的作用.泡泡刺在自然状态下常以灌丛沙堆的形式存在,具有较强的固沙、阻沙作用<sup>[15]</sup>.降水变率和地下水水位的波动都会影响和制约泡泡刺种群的发育和自然消长<sup>[16]</sup>.杨自辉等<sup>[17]</sup>提出降水量在110 mm左右时,泡泡刺

能够维持正常的发育,但是只有连续两年的年均降水量都超过 140 mm 时,泡泡刺才能表现出显著的生长状态.周紫鹃等<sup>[18]</sup>研究发现,泡泡刺群体光合速率在高温强光下的光合速率相对较高,说明泡泡刺对干旱高温的荒漠生境具有较好的适应性.刘冰等<sup>[19]</sup>研究发现,泡泡刺为应对水分胁迫所产生的保护机制是通过“光合下调”来实现的,同时也反映了泡泡刺等荒漠植物与环境协同进化过程中的生态适应性.但是王月等<sup>[20]</sup>发现,土壤水分的持续减少是泡泡刺灌丛沙堆退化的主要原因.因此,水分条件仍然是限制泡泡刺在荒漠生境条件下生存和发展的关键因素,对比不同生境条件下泡泡刺水分来源及其动态变化特征,阐明这两种生境下泡泡刺水分利用策略及对干旱生境的适应机制将会为荒漠区生态环境的恢复和建设提供必要的理论基础.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省河西走廊中部临泽县北部绿洲边缘地区(39°22'—9°23' N, 100°07'—100°08' E). 试验主要以中国科学院临泽内陆河流域研究站(中国科学院临泽站)为研究基地,该站所在区域属于黑河流域中游地区,也是临泽绿洲和巴丹吉林沙漠的交汇处,能够代表我国西北内陆河流域的广大荒漠区,气候类型属于典型的温带大陆性荒漠气候,降水稀少,且分布不均匀,冬季除了受西风控制外还受到极地气团的影响,夏季也受到多种水汽源的影响<sup>[21]</sup>,多年平均降水量为 110.3 mm (1965—2012 年).植被总体特征是组成简单、类型单一、群落不郁闭、分布稀疏.调查发现,旱生和盐生灌木为主要的植物群落.本试验选择沙质和砾质荒漠生境下的泡泡刺为研究对象(图 1),沙质荒漠生境下的泡泡刺是临泽县北部沙区的天然固沙植被,具有良好的阻沙、挡沙功能;砾质荒漠生境下的泡泡刺位于临泽县北部砾质荒漠区,是该区主要的优势种和建群种,对于维持该区生态系统有重要作用.在不同生境条件下采用 10 m×10 m 的样方调查物种的形态特征(表 1),并在样地中采集土壤、植物和地下水样品,进行稳定同位素的测定和植物水分来源的分析.

### 1.2 试验设计和样本描述

试验于 2015 年(4—9 月)在中国科学院临泽内陆河流域研究站附近的荒漠区开展.以沙质生境和砾质生境下泡泡刺为研究对象.在选定的样地中,每个生境选取 6 个形态特征相近的灌丛沙堆,在每月

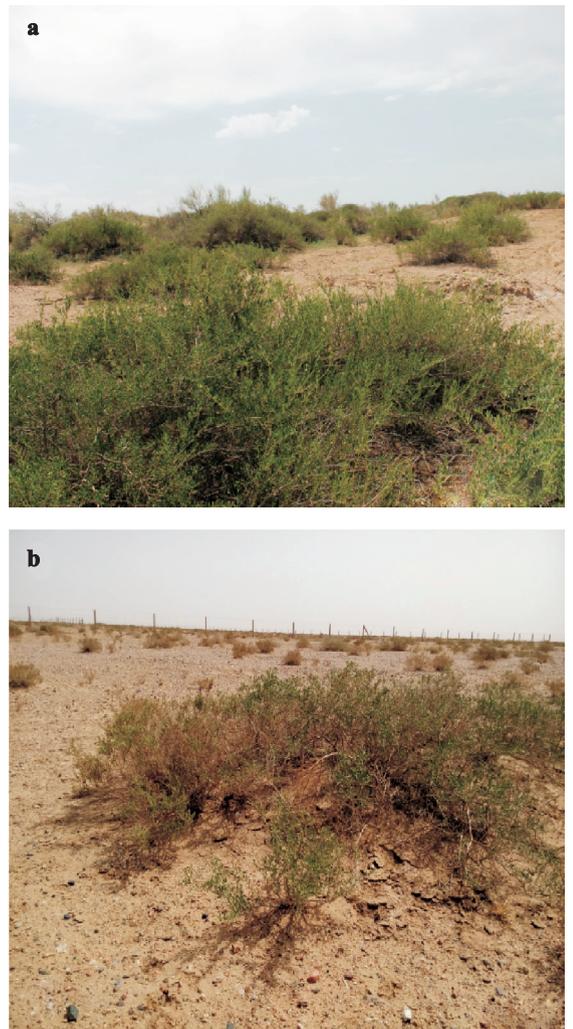


图 1 沙质和砾质生境下的泡泡刺群落

Fig.1 *Nitraria sphaerocarpa* community in dune and gravel desert habitats.

a) 沙质荒漠 Dune desert habitat; b) 砾质荒漠 Gravel desert habitat. 下同 The same below.

表 1 沙质和砾质荒漠生境下泡泡刺种群特征

Table 1 Characteristics of *Nitraria sphaerocarpa* community in the dune and gravel desert habitats

生境 Habitat	沙质荒漠 Dune desert	砾质荒漠 Gravel desert	<i>P</i>
沙堆高度 Nabkha height (cm)	67.2±38.7	27.5±14.1	<0.01
植物高度 Plant height (cm)	36.7±12.7	21.8±5.9	<0.01
冠幅 Canopy (m <sup>2</sup> )	12.5±13.1	3.7±3.2	<0.01
密度 Density (Number of nabkha per hm <sup>2</sup> )	8.2±3.1	14.3±5.3	<0.01
生物量 Biomass (g·m <sup>-2</sup> )	309.2±204.9	206.2±104.3	<0.01
地下水水位 Ground water table (m)	4.5±0.2	11.6±0.12	<0.01

中旬分别取样一次.采样方法:剪取非绿色的栓化小枝(直径 0.3~0.5 cm,长 3~5 cm),迅速去皮后装入

采样瓶,并用 Parafilm 封口膜密封,然后放入随身携带的冰盒中,带回实验室后冷冻保存.分别在选定样方的植株下方用土钻取 0~300 cm(沙质生境)和 0~200 cm(砾质生境)的土壤样品,在 0~100 cm 范围内每 10 cm 取一个样品,100~300 cm 每 20 cm 取一个样品.将采集的部分土壤样品迅速装入 50 mL 的离心管中,并用 Parafilm 封口膜密封,然后放入随身携带的冰盒中,带回实验室后冷冻保存.将剩余土壤样品装入铝盒,带回实验室用烘干法测定土壤含水量.在降雨的前一天和降雨后的 1、2、3、5、8 d,对每一样地的植物样品和土壤样品进行相应的采集.收集试验期间的每次降水,每月在距试验地最近的试验井中取地下水样品.所取液态水样品迅速装入样品瓶,用 Parafilm 封口膜密封,并放入携带的冰盒,带回实验室冷藏(2℃)保存.

### 1.3 样品的测定

在中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室进行样品测定.植物样品和土壤样品采用低温真空冷凝抽提装置抽提水分.采用 LGR 公司的液态水同位素分析仪(LWIA, 912-0008-1001, Los Gatos Research Inc., Mountain View, CA, USA)测量抽提的植物水分、土壤水、降水和地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  值,其中:

$$\delta^{18}\text{O} = \left( \frac{R_{\text{sa}}}{R_{\text{st}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{sa}}$ 是样品中元素的重轻同位素丰度之比( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) $_{\text{sa}}$ ;  $R_{\text{st}}$ 是国际通用标准物(O 稳定同位素采用 v-SMOW)稳定同位素丰度之比( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) $_{\text{st}}$ .

### 1.4 数据处理

植物茎水稳定同位素测定的光谱污染与修正采用了 LGR 公司提供的修正方法:将同一来源的去离子水与 99.9% 色谱纯级的乙醇和甲醇配置成不同浓度梯度的乙醇和甲醇溶液,然后利用本实验室的液态水同位素分析仪逐一测定不同浓度的乙醇和甲醇溶液,以建立  $\delta^{18}\text{O}$  的修正曲线:

甲醇光谱污染校正曲线:

$$\Delta\delta^{18}\text{O} = 0.1666\ln\text{NB}^2 + 0.2123\ln\text{NB} + 0.3541 \quad (2)$$

$(R^2 = 0.994)$

乙醇光谱污染校正曲线:

$$\Delta\delta^{18}\text{O} = -9.12134\ln\text{BB} + 9.1453 \quad (3)$$

$(R^2 = 0.889)$

式中: $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 为真值  $\delta^{18}\text{O}$  的偏差值; $\text{NB}$  和  $\text{BB}$  值可以通过光谱诊断软件(LWIA-SCI)直接得到.

采用 IsoSource 模型<sup>[22]</sup>计算植物对各水源的利

用比例.采用 SPSS 17.0 对试验数据进行相关分析,并用最小显著差数法(LSD)对数据进行多重比较,在 0.05 水平上检验其显著性.

## 2 结果与分析

### 2.1 降水及其稳定同位素特征

研究区降水具有显著的季节变化特征,其中夏季降水约占全年总降水量的 80% 以上,冬季降水偏少,不足全年降水量的 10%. 该区以小降水事件为主,大降水事件频率极小,但是大于 5 mm 的降水事件对总降雨量的影响较大.降水  $\delta^{18}\text{O}$  值的变化范围较大,其值在  $-20.03\text{‰} \sim 8.85\text{‰}$  之间,在全球大气降水的范围( $\delta^{18}\text{O}$ :  $-50\text{‰} \sim 10\text{‰}$ )之内.降水  $\delta^{18}\text{O}$  值具有显著的季节变化特征,冬季  $\delta^{18}\text{O}$  值较小,而夏季较大.基于研究区降水同位素特征的分析,拟合成区域大气降水线方程: $\delta D = 7.262\delta^{18}\text{O} + 2.317$  ( $R^2 = 0.925$ ) (图 2). 大气降水线的斜率和截距受水汽凝结、水汽来源和输送方式、降水的季节效应以及区域空气温度和湿度等因素的影响.相比于全球大气降水线方程,区域大气降水线方程的斜率和截距都偏小.

### 2.2 土壤水稳定同位素特征对降水的响应

**2.2.1 沙质和砾质荒漠区土壤含水量的动态变化**  
如图 3 所示,砾质荒漠区 0~1.0 m 土壤含水量的季节变化特征与沙质荒漠区类似,即夏季土壤水分最高,而春季最低,但是在垂直方向上砾质荒漠区的土壤水分变异较大.夏秋两季砾质荒漠区的土壤水分在垂直剖面上出现了双峰值,分别在 0.3 和 1.5 m 左右的范围内,而春季仅在 1.5 m 左右出现一个峰值.究其原因可能与夏季降雨入渗有关,小降水事件能够有效补给表层土壤水分,但是 0~0.2 m 的土壤水

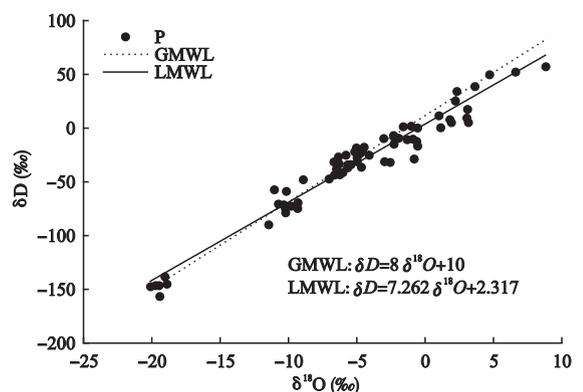


图 2 临泽荒漠绿洲边缘大气降水线

**Fig. 2** Local meteoric water line for the study area in the Linze oasis fringe.

P: 降水 Precipitation; GMWL: 全球大气降水线 Global meteoric water line; LMWL: 当地大气降水线 Local meteoric water line.

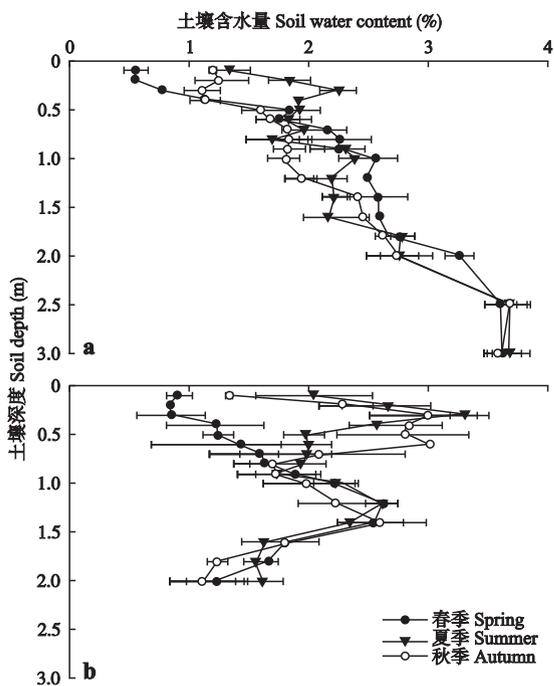


图3 沙质和砾质荒漠区土壤含水量的季节变化  
**Fig.3** Seasonal variations of soil water content in dune and gravel desert habitats.

分容易被蒸发作用消耗,而0.3~0.4 m处土壤水分条件相对较好,而到了春季,由降水补给的表层土壤水分因蒸发作用而被消耗殆尽,即峰值消失;1.2~1.6 m的峰值可能是由大的降水事件通过大孔隙入渗补给累积所致,由于地下水水位较深,很难补给到1.5 m处土壤水分,因此,1.5 m以下的土壤水分随深度的增加而减小。

虽然本研究中的沙质荒漠和砾质荒漠同属一个降水区域,但是两者的土壤水分对降水脉冲的响应存在显著差异(图4)。24.8 mm降雨后第1天(DOY204),沙质土壤中0~0.1 m和0.1~0.2 m处的土壤含水量达到了最大值,降雨后的第2天(DOY205),0.2~0.3 m处的土壤含水量达到最大,说明降水是逐渐向下入渗的,下层土壤接受的降水补给具有滞后性。砾质土壤各层对降水的响应迅速,24.8 mm降雨后第1天(DOY204),0~0.5 m以内的各层土壤水分都达到了最大值,而后0.5~1.0 m处的土壤逐渐响应,说明砾质土壤中存在大孔隙,能够快速补给下层土壤水分,且能够入渗至深层土壤中。8.0 mm的降水发生于前一次降水后的第12天(DOY215),引发了土壤水分的第2次峰值,但是土壤水分的变化幅度相对较小。

**2.2.2 沙质和砾质荒漠区土壤水  $\delta^{18}O$  值的动态变化** 荒漠区土壤水分稳定同位素组成受降水稳定同

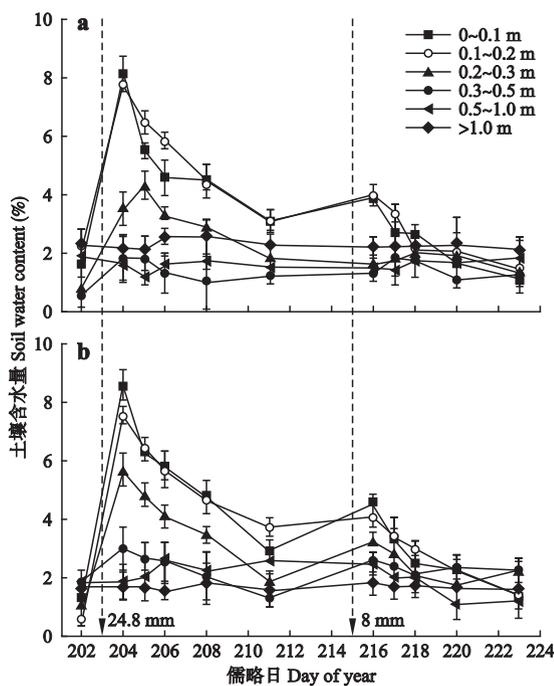


图4 沙质和砾质荒漠区土壤含水量对降水脉冲的响应  
**Fig.4** Response of soil water content to precipitation pulse in dune and gravel desert habitats.

位素季节变化的影响,但是不同类型的荒漠区土壤水分的季节变化差异显著(图5)。沙质荒漠区和砾质荒漠区位于相同的降水区,表层土壤水稳定同位

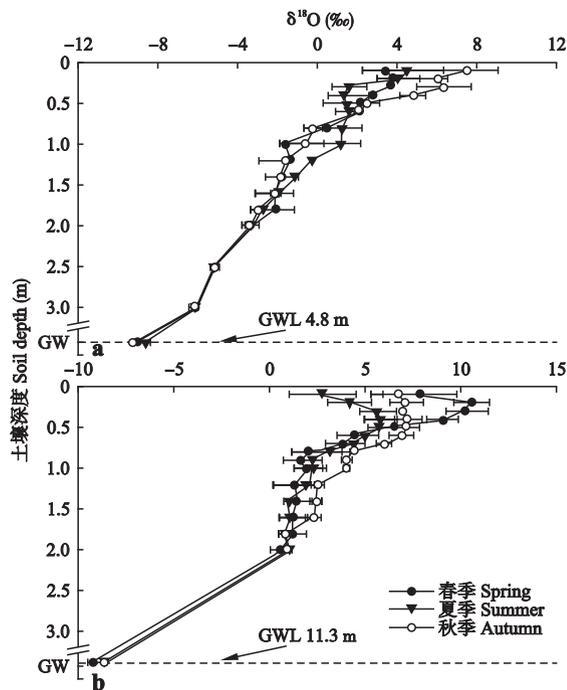


图5 沙质和砾质荒漠区土壤水  $\delta^{18}O$  值的变化特征  
**Fig.5** Vertical distribution and seasonal variation of  $\delta^{18}O$  values of soil water in dune and gravel desert habitats.  
 GW: 地下水 Ground water; GWL: 地下水位 Ground water table.

素的季节动态变化类同,但是在垂直方向上的变化却存在显著差异.沙质荒漠中的土壤水稳定同位素组成沿土壤深度的增加而趋于贫化,且1.0 m以下的土层中土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值都为负值,随着深度的增加而逐渐接近地下水稳定同位素值;而砾质荒漠区的土壤水稳定同位素值在垂直方向上波动较大,且在0~2.0 m土层中土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值都保持在0值以上,说明该区土壤水中大量富集重同位素,即水分严重亏缺.说明荒漠区表层土壤水主要受到降水入渗的补给,而沙质荒漠区的深层土壤水分来源并非仅依靠地下水补给,也可能受到大的降水深层入渗的补给;砾质荒漠区0~2.0 m土层中的土壤水仅受到降水的补给.

荒漠区降水主要以脉动的方式输入,从而引发受降水和蒸发作用控制的表层土壤水稳定同位素组成呈脉动式变化,但是不同类型的荒漠区以及不同量级的降水事件引发的土壤水分动态变化特征不同(图6).24.8 mm的降水事件( $\delta^{18}\text{O}$ : -6.42‰)发生后,沙质荒漠和砾质荒漠区的0.5 m以内的土壤水稳定同位素显著响应,降雨后的第1天(DOY204),砾质荒漠中小于1.0 m的各土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 值迅速达最低值,之后 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐恢复至降雨前的水平,说明砾质荒漠中土壤存在大孔隙使降水迅速入渗;沙质荒漠中只有小于0.2 m的土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 值达最小

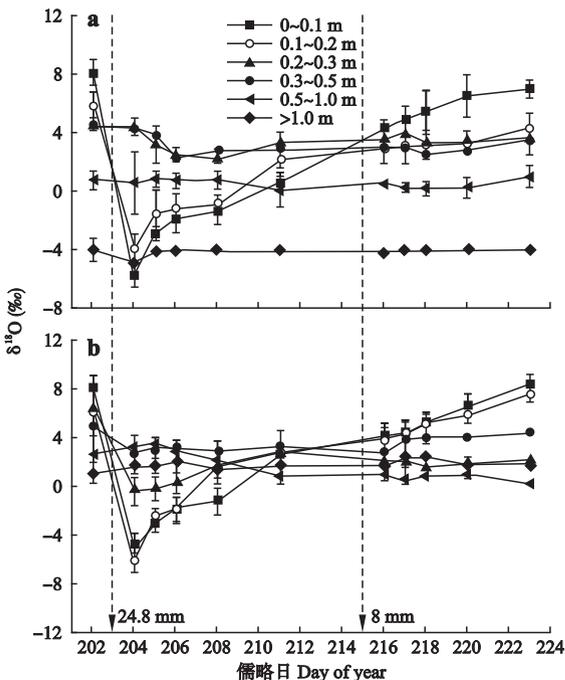


图6 沙质和砾质荒漠区土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值对降水脉冲的响应  
Fig.6 Response of  $\delta^{18}\text{O}$  values of soil water to precipitation pulse in dune and gravel desert habitats.

值,第3天(DOY206) 0.2~0.3 m和0.3~0.5 m处的土壤水才达最小值,说明沙质荒漠中水分的入渗具有滞后性.8 mm的降水事件( $\delta^{18}\text{O}$ : 4.13‰)发生于24.8 mm降水后的第12天(DOY 215),由于降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较接近,因此降水入渗后土壤水分的波动较小,但是蒸发作用对土壤水稳定同位素的富集作用影响较显著.

## 2.3 植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值对降水的响应

### 2.3.1 泡泡刺茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化特征

沙质和砾质荒漠生境条件下的泡泡刺茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 值都具有显著的季节变化特征,但也因生境的不同而差异显著(图7).沙质荒漠和砾质荒漠虽属同一降水区域,但是泡泡刺茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 值却差异显著,砾质荒漠区泡泡刺的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在-3.39‰~1.72‰之间,其变化范围完全分布于降水的变化范围内,而沙质荒漠区泡泡刺的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在-1.91‰~-6.02‰之间,只有夏季降水较多时其值在降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围之内,而降水相对较少的春秋两季脱离降水的变化范围,而靠近于地下水.砾质荒漠生境下的泡泡刺茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于沙质生境下的泡泡刺,且完全在降水控制之下,其原因是砾质荒漠区的地下水水分深至11.5 m,泡泡刺无法利用该区的地下水,降水是其唯一水分来源.说明泡泡刺能够适时调整其水分利用模式,从而在严酷的荒漠中生存.

### 2.3.2 典型降水事件后泡泡刺茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化

荒漠植被可以通过自身形态调节来适应不同环境条件,沙质荒漠区和砾质荒漠区的土壤类型差异显著,但是受到了相同频次降水的影响,这两种不同类型

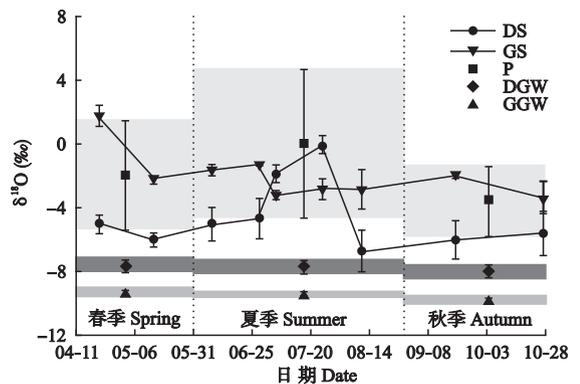


图7 沙质和砾质生境下泡泡刺茎水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化  
Fig.7 Seasonal changes of  $\delta^{18}\text{O}$  values in stem water of *Nitroaria sphaerocarpa* in dune and gravel desert habitats.

DS: 沙质生境下泡泡刺茎水 Stem water of *Nitroaria sphaerocarpa* in dune desert habitat; GS: 砾质生境下泡泡刺茎水 Stem water of *Nitroaria sphaerocarpa* in gravel desert habitat; P: 降雨 Precipitation; DGW: 沙质荒漠区地下水 Ground water in dune desert region; GGW: 砾质荒漠区地下水 Ground water in gravel desert region. 下同 The same below.

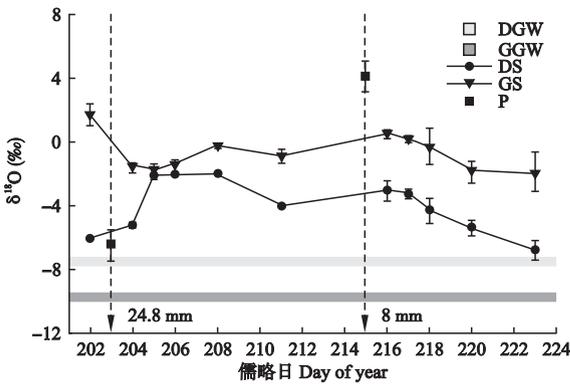


图8 沙质和砾质生境下泡泡刺茎水  $\delta^{18}\text{O}$  值对降水的响应  
Fig.8 Response of  $\delta^{18}\text{O}$  values in stem water of *Nitraria sphaerocarpa* to precipitation in dune and gravel desert habitats.

的荒漠区中都分布着大面积的泡泡刺灌丛.虽然两种荒漠生境的环境条件各不相同,但是植物生长季降水都是以脉冲式的方式输入,且各生境中泡泡刺对降水的响应显著.沙质荒漠和砾质荒漠中泡泡刺茎水稳定同位素在降水前存在显著差异,但是24.8 mm的降水事件( $\delta^{18}\text{O}$ :  $-6.42\text{‰}$ )发生后,两者之间的差值迅速减小,且在降水后的第2天(DOY205),沙质荒漠和砾质荒漠区的泡泡刺  $\delta^{18}\text{O}$  值分别达到最大值( $-2.05\text{‰}$ )和最小值( $-1.66\text{‰}$ ),两者之间的差值也达最小,而后逐渐向降水前的水平恢复,第12天(DOY215)再次发生8 mm( $\delta^{18}\text{O}$ :  $4.13\text{‰}$ )降水事件后,两种荒漠生境下的泡泡刺茎水再次发生次一级的响应(图8).两种荒漠生境条件下的泡泡刺都对降水响应显著,但是其稳定同位素值的变化受前期植物水分和降水稳定同位素值的影响较大,降水过后都表现出了向降水稳定同位素值靠近的趋势,之后趋于富集重同位素,其原因是降水后在蒸发作用下有降水补给的土壤水逐渐富集重同位素,植物吸收这部分水分后使得其同位素值趋于增加,当降水补给的土壤水分消耗殆尽后,植物所利用的水分逐渐向降雨前的水平恢复.

## 2.4 植物水分来源

**2.4.1 植物水分来源随生境的变化** 沙质和砾质荒漠生境下泡泡刺具有相同的水分调节机制,即根据外界环境中水分的变化而灵活调节其主要的水分来源区域.如图9所示,沙质荒漠中泡泡刺的水分在降水较少的春季和秋季深层土壤水和地下水的贡献率分别为27.1%和51.2%,而在降水较多的夏季,深层土壤水和地下水的贡献率显著降低,而表层和中间层土壤水对泡泡刺的贡献率可达21.7%和30.4%.砾质荒漠区的泡泡刺理论上无法利用到地下水,因

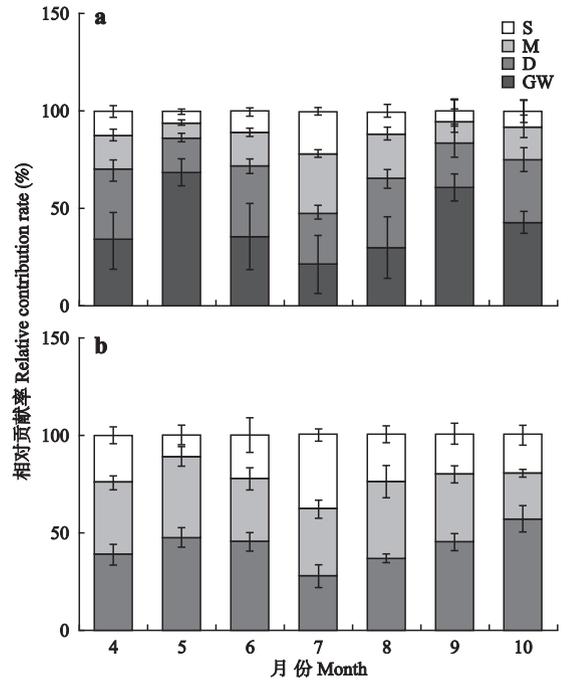


图9 沙质和砾质荒漠生境下泡泡刺水分来源的季节变化  
Fig.9 Seasonal changes of water sources of *Nitraria sphaerocarpa* in dune and gravel desert habitats.

S: 浅层土壤 Shallow soil; M: 中间层土壤 Middle soil; D: 深层土壤 Deep soil; GW: 地下水 Ground water.

此其水分来源仅限于表层、中间层和深层土壤水,在降水较多的夏季,土壤水分条件相对较好,其中表层土壤水的贡献率可达38%,而在春秋两季各层土壤水分都严重匮乏,尤其是表层土壤水的贡献率显著降低,仅靠储存于深层土壤中的水分来维持.因此,泡泡刺能够在不同的环境条件下适时、适度地调节其主要的水分来源区域,这也是泡泡刺能够在严酷的荒漠生境下生存的策略之一.

**2.4.2 典型降水事件后泡泡刺水分来源的变化** 荒漠区降水以脉动的方式输入,显著影响着各潜在水源对泡泡刺的贡献比例,而且不同类型的荒漠区域以及不同的降水分布特征都会对泡泡刺水分来源产生不同程度的影响(图10).24.8 mm降水发生后,泡泡刺对表层土壤水分的利用比例显著增加,降雨后第1天(DOY205),表层土壤水的贡献率由降雨前的6.7%增加至14.3%,第3天(DOY205)达到最大值,为36.5%,同时地下水的贡献比例降低至最小值,仅为12.4%,之后随着表层土壤含水量的降低其贡献比例逐渐减小,第12天(DOY215)再次发生8.0 mm的降水,各潜在水源的贡献率再次发生次一级的脉动式的波动;而砾质荒漠区表层土壤水分的贡献率第1天(DOY204)就达到最大值,为41.3%,而后逐渐降低,中间层土壤水的贡献率在第3天

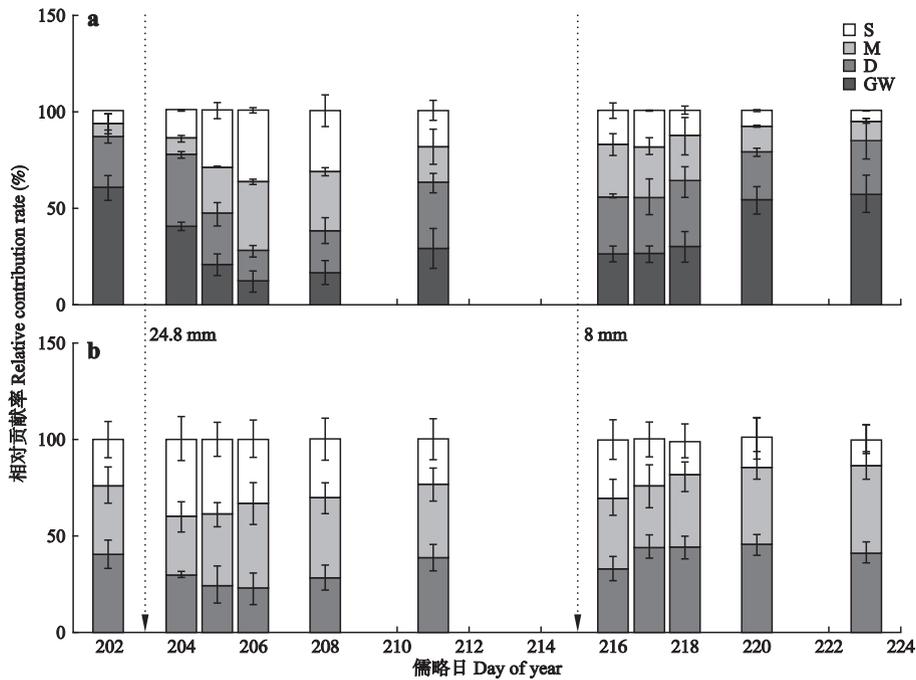


图 10 降水前后沙质和砾质荒漠区泡泡刺水分来源的动态变化

Fig.10 Dynamic changes of water sources for *Nitraria sphaerocarpa* before and after precipitation in dune and gravel desert habitats.

(DOY206)达最大值,为44.2%,降水后深层土壤水的贡献比例先减小后逐渐增大,第12天(DOY215)再次发生8 mm的次一级降水,泡泡刺的水分来源再次发生次一级的波动.两种荒漠区泡泡刺对降水脉动的响应存在显著差异,其中砾质荒漠区对降水的响应速度最快,且响应持续时间较长,其原因是降水是该区泡泡刺的唯一水分来源;沙质荒漠区对降水的响应相对迟缓,但是降水可以使泡泡刺主要的水分来源由地下水和深层土壤水短暂转变为浅层土壤水.

### 3 讨 论

在荒漠区,降水分布及其稳定同位素组成的变异性较大,夏季降水稳定同位素值相对偏高( $-10.66‰ \sim 8.85‰$ ),这与全球范围内干旱区降水稳定同位素值偏大一致<sup>[23]</sup>,而冬季偏小( $-18.86‰ \sim -20.03‰$ ).其主要原因是研究区夏季降水主要来源于西风带的输送,冬季降水除了受西风带控制外还受到极地气团的影响<sup>[21]</sup>.冷暖季节不同的水汽来源以及蒸发和冷凝过程是导致降水稳定同位素组成差异显著的重要原因<sup>[24]</sup>.研究区大气降水线与郑淑慧等<sup>[25]</sup>提出的全国大气降水线方程( $\delta D = 7.92\delta^{18}O + 8.2$ )相比较,区域大气降水线方程的斜率和截距都显著偏小,表明该区域的降水过程中稳定同位素受到了二次蒸发的影响.荒漠区降水分布具有极高的

变异性,且降水对土壤水分及其稳定同位素的组成具有重要影响<sup>[26-27]</sup>.小降水( $<5$  mm)是荒漠区降水事件的主体,而大降水事件的发生相对较少<sup>[28]</sup>.通常,小降水事件只能引起表层土壤水分变化,而大降水事件虽然发生频率较低,但能够有效补给深层土壤水分<sup>[29]</sup>.降水入渗后与土壤中原有水分混合构成新的土壤水,其稳定同位素值随着时间的推移不断发生着变化.研究发现,降水事件发生后土壤水 $\delta^{18}O$ 值的变化与降水的 $\delta^{18}O$ 值和降雨量的大小密切相关,如8 mm的降水入渗后 $\delta^{18}O$ 值的变化幅度相对较小,而24.8 mm降水能显著改变土壤水的 $\delta^{18}O$ 值,即降水量与土壤质地共同影响着降水的入渗量和入渗深度<sup>[30]</sup>.

荒漠生态系统中通常以超旱生灌木为优势种或建群种,其生长和发展受到水分条件的限制<sup>[12,31]</sup>.植物能够利用的水分主要来源于降水、土壤水和地下水<sup>[12]</sup>,而降水格局在一定程度上决定了植物的水分来源和水分利用策略,进而影响生态系统中的群落结构<sup>[32]</sup>.虽然荒漠区降水偏少,但每一次降水所引起的短期水资源的富集在一定程度上对植物的生长具有重要作用<sup>[7]</sup>.因此,植物吸收和利用水分的模式决定了生态系统对环境水分的响应<sup>[5]</sup>,其中,荒漠灌木对环境水分变化的响应与其水分利用策略紧密相关<sup>[33]</sup>.本研究区分布着大面积不同生境条件下的泡泡刺群落等典型荒漠植物,其水分来源和水分利

用策略都存在显著的动态变化特征。

泡泡刺的生长和发育受水分条件的限制<sup>[16]</sup>,其形态特征和功能型并不是恒定不变的,当环境条件发生变化时,可以对其形态特征和功能型进行调节<sup>[34]</sup>。在降水变异较大的荒漠区,泡泡刺可以根据降水的多寡而灵活调节其水分来源<sup>[35]</sup>。虽然研究中沙质荒漠区和砾质荒漠区同属一个降水区域,且降水主要集中在夏季,但是两区域的水分条件却存在显著差异,其主要原因是砾质荒漠区的地下水深至11.5 m,泡泡刺无法利用该区的地下水资源,只能完全依靠降水生存;而沙质荒漠区地下水相对较浅,当降水减少,无法满足泡泡刺水分利用时,泡泡刺可以转而利用地下水。因此,泡泡刺在不同的荒漠生境条件下能够根据生境条件灵活调整其形态特征。土壤特性、环境水分条件以及植物的表现型对植物的水分利用方式具有决定性的作用<sup>[36]</sup>。沙质和砾质荒漠中的水分条件各不相同,且在这两种生境下的泡泡刺的水分利用方式也存在显著差异(图9、10)。其主要原因是荒漠生境条件下的灌木可以通过根系的形态调节向着最优表现型发展,以最大程度地获取水资源<sup>[34]</sup>。沙质生境下的泡泡刺发育有完善的二态性根系<sup>[11]</sup>,能够在降水较多的季节最大程度地利用降水,而在降水较小的季节可以最大程度地利用地下水;砾质生境下泡泡刺只能利用降水来维持其生存,其灌丛趋于形成小斑块、高密度的空间格局<sup>[16]</sup>,但能够对降水事件快速反应。

#### 4 结 论

在年平均降雨量不足150 mm的两个极端干旱的荒漠生境条件下,泡泡刺对降水变化的响应显著。荒漠区虽然以小降水为主,但每一次的降水都会引起泡泡刺对浅层土壤水分利用比例的峰值,虽然大降水事件发生频率较低,但能够对深度土壤水形成有效的补给,甚至对整个荒漠生态系统的可持续发展都有十分重要的意义。沙质和砾质荒漠生境下的泡泡刺的形态特征存在显著差异,其主要原因是两种荒漠生境下可利用水资源的差异。沙质生境下的泡泡刺在降水较多时能够充分利用由降水补给的表层土壤水分,而当降水偏少时能够以深层土壤水和地下水为主要水分来源,表现出大灌丛、低密度的形态特征。砾质荒漠生境下泡泡刺仅能利用降水,以高密度、小灌丛的形式存在,能够在降水事件发生时快速、最大量地捕获入渗在表层土壤中的水分。因此,泡泡刺在两种生境条件下以不同的水分利用策略来

调节其生长特征,以期最大限度获取水分,增加其在荒漠中对有限水资源的竞争优势。

#### 参考文献

- [1] Schwinning S, Sala OE, Loik ME, *et al.* Thresholds, memory, and seasonality: Understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, **141**: 191–193
- [2] Yang B, Wen X, Sun X. 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*, 2015, **201**: 218–228
- [3] Ehleringer JR, Dawson TE. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 1992, **15**: 1073–1082
- [4] Javaux M, Rothfuss Y, Vanderborght J, *et al.* Isotopic composition of plant water sources. *Nature*, 2016, **536**: E1–E3
- [5] Ewe SML, Sternberg LSL, Busch DE. Water-use patterns of woody species in pineland and hammock communities of South Florida. *Forest Ecology and Management*, 1999, **118**: 139–148
- [6] Wang Y-L (王艳莉), Liu L-C (刘立超), Gao Y-H (高艳红), *et al.* Analysis of water sources of plants in artificial sand-fixation vegetation area based on large rainfall events. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2016, **27**(4): 1053–1060 (in Chinese)
- [7] Schwinning S, Sala OE. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, **141**: 211–220
- [8] Zhang T-G (张铁钢), Li Z-B (李占斌), Li P (李鹏). Response characteristic of soil water use patterns by different plants to precipitation in rocky mountainous areas. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2016, **27**(5): 1461–1467 (in Chinese)
- [9] Eggemeyer KD, Awada T, Harvey FE, *et al.* Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* and two dominant C4 grasses in a semiarid grassland. *Tree Physiology*, 2009, **29**: 157–169
- [10] Huang B, Gao H. Root physiological characteristics associated with drought resistance in tall fescue cultivars. *Crop Science*, 2000, **40**: 196–203
- [11] Dawson TE, Pate JS. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phreatophyte plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation. *Oecologia* 1996, **107**: 13–20
- [12] Ehleringer JR, Phillips SL, Schuster WSF, *et al.* Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia*, 1991, **88**: 430–434
- [13] Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, *et al.* Stable isotope in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, **33**: 507–559
- [14] Yezpey EA, Williams DG, Scott RL, *et al.* Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid

- savanna woodland from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **119**: 53–68
- [15] Ren J (任 珺), Tao L (陶 玲). A numerical taxonomy of the genus *Nitraria* from Gansu Province, China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2003, **23**(4): 572–576 (in Chinese)
- [16] Li Q-Y (李秋艳), He Z-B (何志斌), Zhao W-Z (赵文智), *et al.* Spatial pattern of *Nitraria sphaerocarpa* population and dynamics in different habitats. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2004, **24**(4): 484–488 (in Chinese)
- [17] Yang Z-H (杨自辉), Gao Z-H (高志海). Impact of precipitation and underground water level in the edge of oases on growth and decline of *Nitraria tangutorum* community. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(6): 923–926 (in Chinese)
- [18] Zhou Z-J (周紫鹃), Su P-X (苏培玺), Xie T-T (解婷婷). Relationship between canopy photosynthesis characteristics of *Nitraria sphaerocarpa* and environmental factors in Hexi Corridor desert. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2012, **32**(9): 1866–1873 (in Chinese)
- [19] Liu B (刘 冰), Zhao W-Z (赵文智). Ecological adaptability of photosynthesis and water metabolism for *Tamarix ramosissima* and *Nitraria sphaerocarpa* in desert-oasis ecotone. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2009, **29**(1): 101–107 (in Chinese)
- [20] Wang Y (王 月), Li C (李 程), Li A-D (李爱德), *et al.* The degradation of *Nitraria* dunes and soil water in Minqin oasis. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(5): 1407–1421 (in Chinese)
- [21] Zhao L-J (赵良菊), Yin L (尹 力), Xiao H-L (肖洪浪), *et al.* Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2011, **56**(1): 58–67 (in Chinese)
- [22] Phillips DL, Gregg JW. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, **136**: 261–269
- [23] Zhang X-P (章新平), Liu J-M (刘晶森), Sun W-Z (孙维贞), *et al.* Study on relationship between stable oxygen isotope in precipitation and relative metrological parameters in Southwest China. *Science in China (Series D)* (中国科学: D 辑), 2006, **36**(9): 850–859 (in Chinese)
- [24] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, **16**: 436–468
- [25] Zheng S-H (郑淑慧), Hou F-G (侯发高), Ni B-L (倪宝玲). A study on hydrogen and oxygen isotopes composition of precipitation in China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1983, **28**(3): 801–806 (in Chinese)
- [26] Weltzin JF, Tissue DT. Resource pulses in arid environments: Patterns of rain, patterns of life. *New Phytologist*, 2002, **157**: 171–173
- [27] Reynolds J, Kemp P, Ogle KR, *et al.* Modifying the ‘pulse-reserve’ paradigm for deserts of North America: Precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 2004, **141**: 194–210
- [28] Sala OE, Lauenroth WK. Small rainfall events: An ecological role in semiarid regions. *Oecologia*, 1982, **53**: 301–304
- [29] Pan Y-X (潘颜霞), Wang X-P (王新平), Su Y-G (苏延桂), *et al.* Temporal stability of surface soil moisture in artificially revegetated desert area. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2009, **29**(1): 81–86 (in Chinese)
- [30] McAuliffe JR. The interface between precipitation and vegetation// Weltzin JF, McPherson GR, eds. *Changing Precipitation Regimes and Terrestrial Ecosystems*. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 2003: 9–27
- [31] Snyder KA, Williams DG. Defoliation alters water uptake by deep and shallow roots of *Prosopis velutina* (Velvet Mesquite). *Functional Ecology*, 2003, **17**: 363–374
- [32] Pausas JG, Austin MP. Patterns of plant species richness in relation to different environments: An appraisal. *Journal of Vegetation Science*, 2001, **12**: 153–166
- [33] Xu H, Li Y. Water use strategy of three central Asian desert shrubs and their responses to rain pulse events. *Plant and Soil*, 2006, **285**: 5–17
- [34] Xu H, Li Y, Xu GQ, *et al.* Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation. *Plant, Cell and Environment*, 2007, **30**: 399–409
- [35] Zhou Y-D (周雅聘), Chen S-P (陈世萍), Song W-M (宋维民). Water-use strategies of two desert plants along a precipitation gradient in northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(8): 789–800 (in Chinese)
- [36] Flanagan LB, Ehleringer JR, Marshall JD. Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell and Environment*, 1992, **15**: 831–836

---

作者简介 周 海,男,1985年生,博士.主要从事生态水文学研究. E-mail: zhouhai1201@126.com

责任编辑 张凤丽

---