

DOI: 10.5846/stxb202007131821

田丽慧, 汪海娇, 张登山, 王俏雨, 刘蕊娜. 高寒沙地典型固沙植物在沙丘不同地貌部位的水分利用特征. 生态学报, 2021, 41(15): 6215-6226.
Tian L H, Wang H J, Zhang D S, Wang Q Y, Liu R N. Water use patterns for a typical afforested shrub among topographic positions in an alpine desert of Qinghai-Tibet Plateau using stable isotopes tracers. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6215-6226.

高寒沙地典型固沙植物在沙丘不同地貌部位的水分利用特征

田丽慧^{1,2}, 汪海娇¹, 张登山^{1,*}, 王俏雨¹, 刘蕊娜¹

1 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海省农林科学院, 西宁 810016

2 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 乌柳是高寒半干旱沙地植被恢复中常用的灌木树种, 对乌柳水分利用来源的研究有助于理解沙地人工生态系统的稳定性维持及可持续发展。在青海湖湖东沙地, 以沙丘不同地貌部位(迎风坡、丘顶和背风坡)生长的乌柳为研究对象, 利用 IsoSource 模型分析植物生长季内的水分利用来源。研究结果表明: 在生长季内, 乌柳主要利用 3 个层次的土壤水, 但不同地貌部位的乌柳在不同生长季利用不同层次的土壤水。生长季初期, 迎风坡的乌柳以深层(60—150cm)土壤水为主要水源(50.28±18.11)%, 而丘顶和背风坡的乌柳主要利用表层 20cm 的土壤水, 利用比例分别为(79.96±7.59)%和(53.47±6.47)%。生长季中期, 迎风坡的乌柳更多地利用中层 20—60cm 土壤水(45.52±26.91)%, 丘顶的乌柳主要利用表层土壤水(45.17±20.14)%, 而背风坡的乌柳以深层土壤水为主要水源(39.26±23.28)%。生长季末期, 迎风坡的乌柳仍以(46.07±27.17)%的比例利用中层土壤水, 丘顶的乌柳转而利用深层土壤水(44.25±26.23)%, 而背风坡的乌柳却以表层土壤水作为主要水源(42.57±18.78)%。不同沙丘地貌部位乌柳对土壤水分的利用模式与其根系分布特征及其下方的土壤含水量具有相关性。

关键词: 稳定同位素; 水分利用特征; IsoSource 混合模型; 高寒沙地; 植被恢复

Water use patterns for a typical afforested shrub among topographic positions in an alpine desert of Qinghai-Tibet Plateau using stable isotopes tracers

TIAN Lihui^{1,2}, WANG Haijiao¹, ZHANG Dengshan^{1,*}, WANG Qiaoyu¹, LIU Ruina¹

1 State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: *Salix cheilophila* is a typical afforested shrub species that is widely used as the sand-binding shrub in alpine and semi-arid sandy land. Research on water use source of *S. cheilophila* helps to understand the stability and maintenance of the artificial ecosystem of desert sustainable development. In the sandy land at east shore of the Qinghai Lake, we took *S. cheilophila* growing on different geomorphology of the dunes (windward slope, dune top, and leeward slope) as objects to analyze water use source during the plant growth season by IsoSource isotope mixing model. The results showed that *S. cheilophila* mainly absorbed three layers of soil water during growing season in 2018, and individuals among different topographic positions used different layers of soil water in different growing seasons. At the beginning of the growing season, *S. cheilophila* on the windward slope primarily depended on deep soil water in 60—120 cm depth and the proportion was (50.28±18.11)%, while individuals on the top of the dune and the leeward slope used (79.96±7.59)% and (53.47±6.47)% surface soil water of 20 cm depth. In the middle of the growing season, *S. cheilophila* on the windward slope absorbed (45.52±26.91)% the middle layer of 20—60cm soil water, however, *S. cheilophila* on the top of the dune and

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961017); 青海省重大科技专项(2018-NK-A3); 地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金资助项目(2020-KF-06)

收稿日期: 2020-07-13; **网络出版日期:** 2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dshzhang@bnu.edu.cn

leeward slope took up (45.17 ± 20.14)% shallow 20 cm soil water and (39.26 ± 23.28)% deep soil water under 60 cm soil depth, respectively. At the end of the growing season, *S. cheilophila* on the windward slope still used (46.07 ± 27.17)% middle layer of soil water, and individuals on the top of dune transferred to rely on (44.25 ± 26.23)% deep soil water, while *S. cheilophila* on the leeward slope switched to take up (42.57 ± 18.78)% surface soil water as main water source. The differences in water use patterns are closely linked with the range of the active root zones and soil water content along different micro-topography conditions. This study can provide insight into plant-water relations to facilitate the selection of woody species for afforestation and desert restoration management in the semiarid desert region.

Key Words: stable isotopes; water use pattern; IsoSource isotope mixing model; alpine desert; vegetation restoration

土地荒漠化问题是当前全球面临的主要环境问题之一,荒漠化地区的生态环境特征及其演变趋势不仅严重影响生态系统的稳定性,也日益威胁人类的生活生产和区域的可持续发展^[1-2]。通过人工措施来保护、恢复、改造、建设植被是防治土地沙漠化的有效措施,也是利用沙化土地的重要途径^[3]。我国利用人工植被进行沙害防治已有 60 年的历史,其中灌木是干旱、半干旱沙区的主要固沙先锋树种。在沙区人工植被固沙实践中,植被治沙的成功与否,很大程度上取决于先锋固沙植物与周围环境因子的相适应程度。水分是沙区植物存活与生长的最重要限制因子^[4],水文过程决定沙区土壤—植被系统的演化方向和生态功能^[5],因而植物水分关系研究是系统认识沙地植物适应和固沙物种遴选的关键。由于人工固沙植被的建立改变了原来沙丘的水量平衡和土壤水分的空间分布格局^[6],固沙植物在干旱条件下如何利用和维持水分是沙地生态水文研究过程中的重点。然而,高寒沙区人工固沙植物如何适应寒冷干旱的环境的气候的研究相对较为缺乏,开展高寒区沙地固沙植物的生态适应性研究,使人工植物群落逐渐向稳定的天然植物群落演化,达到长期防风固沙效果,对高寒沙化土地的治理具有重要的理论意义。

20 世纪 80 年代,稳定同位素技术被引至生态学领域,逐渐成为认识和理解植物与水分关系的有力工具。除了极少数盐生植物、旱生植物和湿地植物外^[7-8],陆地植物根系吸收的水分在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同位素分馏现象^[4],因此,利用 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素可反映植物组织内 H、O 稳定同位素是不同水源(降水、地下水、土壤水)的综合组成,从而可有效辨别和区分植物水分利用来源。国内外大量学者已经围绕沙地植物的吸水深度开展了相关研究,认为干旱半干旱区植物群落根系水分利用模式往往具有典型的“两层用水模式”,即深根本本植物主要利用深层土壤水或地下水,而浅根草本植物依靠降水补给后的浅层土壤水^[9-10],但植物的吸水深度受多种外在因素的影响,比如气候条件、植物的功能型、地形、生长阶段、根系分布及形态等。地形会引起土壤水分和养分的再分配^[11-13],已有研究表明沙丘和丘间地具有明显的水分和养分时空异质性^[14],从而引起植物叶片的水分利用效率和气孔导度的差异^[15-17],进而导致植物对水分的利用产生差异。比如古尔班通古特沙漠沙丘上的梭梭在生长季初期主要利用中层土壤水,生长季中后期主要利用深层土壤水,而丘间地梭梭始终以地下水为主要水源^[14,18]。在沙地环境中,沙丘具有微地貌特征,比如迎风坡、丘顶和背风坡,而以往的研究却忽视了这种微地形对植物水分来源的影响,这在很大程度上限制了植物水分关系及生态适应策略研究的进一步开展。

乌柳(*Salix cheilophila*)为杨柳科柳属多年生落叶灌木或小乔木,是中国特有种^[19],在高寒沙地的治沙工程中,发挥着重要的水土保持和防风固沙的功能^[20]。乌柳在共和盆地的治沙效果明显^[21],2008 年将其引进到青海湖流域的治沙工程中。乌柳在共和盆地主要栽种在丘间地,而在青海湖沙地是以高秆深栽的方式种植于沙丘的各个地貌部位,乌柳在沙丘的成活率可达 98%,3 年的保存率也维持在 92%^[22]。以往关于乌柳生态特征及其与水分关系的研究都集中在共和盆地丘间地栽植的乌柳^[21],而较少关注乌柳在沙丘上的生长状态及其对水分的利用。因此,本文以生长在不同沙丘地貌部位的典型固沙植物乌柳为研究对象,利用 H、O 同位素技术分析其在生长季的水分来源特征及其变化,并分析引起这种变化的影响因素,以为高寒沙地治理提供一定的理论基础,并丰富沙地生态水文的研究内容。

1 试验地概况

青海湖湖东克土沙地位于 $100^{\circ}47'—100^{\circ}50'E$, $36^{\circ}47'—36^{\circ}50'N$, 海拔 3176—3340m, 面积约 753km², 地处三大自然环境区域的交汇地带, 是高寒半干旱典型生态脆弱区^[23] (研究样地位置参见^[24])。根据 1981—2019 年距离本区 20km 的海晏县气象数据计算可得, 本区年均气温为 0.93℃, 年均降水量 438.6 mm, 冬季盛行西-西北(W-NW)风, 年均风速约 4.5m/s^[24]。本区植物的生长季为 5 月中旬至 9 月下旬。

1980 年, 青海省海北州海晏县林业局在青海湖湖滨沙区的克土建立了治沙站, 采取封沙育草保护植被与种树种草相结合的方法治沙, 一系列防沙治沙造林工程项目的实施使得本区的沙化土地得到了有效遏制^[25]。2008 年, 北京师范大学在本区围封了近 667hm² 的土地作为防沙治沙试验示范区, 引进了数十种固沙植物。2008—2017 年, 本区植被盖度恢复效益超过 70%, 沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、乌柳、樟子松(*Pinus sylvestris*) 和小叶杨(*Populus simonii*) 林的防风效益>50%, 固沙效益>85%, 土壤有机质与速效养分含量增长较快, 人工沙地生态群落较为稳定^[24]。

2 研究方法

2.1 样品采集

2018 年春季, 在青海湖湖东克土防沙治沙示范区选择 2009 年栽植乌柳的沙丘, 在沙丘迎风坡、丘顶和背风坡分别设置 3 个 10 m × 10 m 的固定样方, 测定乌柳的高度、冠幅等指标(表 1)。同时, 在各样方内采集表层 150cm 的土壤分析粒度组成(表 2)。

表 1 研究样地乌柳的生态特征

Table 1 Community features of *S. cheilophila* at study sites

位置 Position	高度 Height/cm	西-东宽度 West-East length/cm	北-南宽度 North-South length/cm	盖度 Coverage/%	群落丰富度 Richness
迎风坡 Windward	155.50(56.97)	123.25(54.96)	115.50(52.67)	51.81(4.70)	6
丘顶 Top	210.83(25.77)	168.67(13.44)	126.67(29.79)	51.41(2.19)	6
背风坡 Leeward	186.57(48.50)	147.57(40.26)	112.57(51.42)	49.82(3.93)	8

数据表示平均值(标准误)

表 2 研究样地 0—150cm 深度土壤粒度组成/%

Table 2 Particle size composition (%) at study sites

位置 Position	粘粒 Clay	粉粒 Silt	极细砂 Very-fine sand	细砂 Fine sand	中砂 Medium sand	粗砂 Coarse sand
迎风坡 Windward	0.27(0.09)	4.97(1.41)	4.71(1.08)	34.46(1.62)	47.73(1.38)	7.86(1.35)
丘顶 Top	0.22(0.19)	4.20(1.47)	5.62(1.69)	25.09(7.98)	50.87(5.43)	13.98(7.88)
背风坡 Leeward	0.29(0.14)	5.32(1.22)	5.62(0.67)	36.27(5.40)	44.53(2.90)	7.69(5.64)

本样地地表沉积物不含极粗砂(1—2mm), 粘粒:<0.005mm, 粉粒:0.005—0.05mm, 极细砂:0.05—0.1mm, 细砂:0.1—0.25mm, 中砂:0.25—0.5mm, 粗砂:0.5—1mm; 数据表示平均值(标准误)

2018 年 5 月 15 日、6 月 17 日、7 月 18 日、8 月 16 日和 9 月 15 日分别采集植物枝条木质部和土壤样品。在选定的每个样方内, 选取生长旺盛且形态特征相近的乌柳 3 株, 在距离地面 150cm 的高度处, 分别从植株东西南北四个方向剪取非绿色的栓化小枝, 去掉外皮和韧皮部后剪短装入 10mL 的玻璃瓶。每月在每个样方内采集 3 瓶样品, 实验期内共计 45 个植物样。同时, 在植物附近用土钻收集不同深度的土壤样品(0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100cm、100—150 cm) 装入 10 mL 的玻璃瓶中。由于表层 10cm 土壤样品较干, 每次采集 5 瓶, 其余土层都采集 2 瓶, 确保可抽提 0.75—1mL 的水。每月每个样方内采集 17 瓶样品, 共计 255 个土壤样品。所有样品都用 parafilm 封口膜密封并放入便携式的冰箱, 带入实验室内在 -20℃ 下冷冻直至室内抽提分析。在分层采集土壤用于同位素分析时, 将另一部分土样装入铝盒中, 带回

实验室 105℃ 烘干测定土壤质量含水量 (soil water content, %)。

降水样品用自制降水收集装置收集, 为了避免蒸发影响, 在塑料瓶内放置乳胶管。每次降雨过后及时转入 30mL 的密封瓶中, 用 parafilm 封口膜密封保存在 4℃ 冰箱中直到测试分析。降水量的数据来源于研究区内放置的自计式雨量筒。本区沙地的地下水在丘间地的埋深深度为 1.5—5.0m, 人工治理沙丘的高度在 8—12m, 生长在沙丘上的人工固沙植物一般较难利用地下水。此外, 乌柳在本区为高秆深栽造林, 植物根系向水平方向延伸较广, 在本区主要分布在地表 100cm 深度以内, 因此, 本文研究中不考虑地下水对乌柳水分利用来源的影响。

2.2 同位素分析

利用传统的低温真空蒸馏法 (Lica-2100 Pro, 北京理加联合科技有限公司) 从植物茎干和土壤样中抽提土壤水和植物水。抽提出的水分放在 2mL 玻璃样品瓶中密封, 并低温保存 (4℃)。对抽提的土壤水、植物水及收集到的降水用液态同位素分析仪 (DLT-100) 测试水中 H、O 稳定同位素比率。DLT-100 测定植物茎秆水同位素时, 由于存在有机污染物, 可能使得测量结果有误差, 因此利用光谱污染校正软件 (LWIA-SCI) 进行诊断, 将对有干扰的同位素值进行校正。本研究采用了 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 DLT-100 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。具体如下:

甲醇光谱污染校正曲线:

$$\Delta\delta^{18}\text{O} = 0.166\ln(NB)^2 + 0.2123\ln(NB) + 0.3541 \quad (R^2 = 0.994) \quad (1)$$

乙醇光谱污染校正曲线:

$$\Delta\delta^{18}\text{O} = -9.12134\ln(BB) + 9.1453 \quad (R^2 = 0.889) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 为真值 $\delta^{18}\text{O}$ 值的偏差值, NB 和 BB 值可以通过光谱诊断软件 (LWIA-SCI) 直接得出。

所有样品测量同位素比率均相对于标准样比率计算得到:

$$\delta^{18}\text{O} = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (3)$$

式中, R_{sample} 为样品中氢氧同位素比率, R_{standard} 为标准样品中氢氧同位素比率。其中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均相对于国际标准样品 (VSMOW), 其中, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试的误差分别为 $\delta D \leq 1.2\text{‰}(\sigma)$, $\delta^{18}\text{O} \leq 0.3\text{‰}(\sigma)$ 。

2.3 数据分析

由于 H 同位素在部分植物的木质部中有分馏现象^[7-8], 为了消除 H 同位素分馏引起的差异, 只用 O 同位素在 IsoSource 多元混合模型中分析乌柳的水分来源^[26], 其中, 数据增量设置为 1%, 质量公差设置为 0.5%。根据植物在沙地中植物的生长特征及土壤水分分布特征^[27], 将土壤水分划分为以下三层:

(1) 表层土壤水 (0—20 cm): 土壤水同位素值和土壤水分变异程度最高, 且易受到降水和蒸发季节变化的影响;

(2) 中层土壤水 (20—60cm): 较低的同位素组成, 相对表层受到季节变化的影响较小;

(3) 深层土壤水 (60—150cm): 土壤含水量和同位素组成都相对较为稳定。

为了比较土壤含水量、土壤水的同位素组成及水分利用比例的差异性, 以上得到的数据都在 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 中进行方差分析。其中, 土壤含水量、土壤水的同位素组成的季节变化采用多因素方差分析 LSD, 且在 0.05 水平上检验其显著性, 而土壤含水量、土壤水的同位素组成随着深度的变化和地貌部位间的变化采用单因素方差分析 (ANOVA) 并用 Turkey's 检验分析其显著性。

3 结果与分析

3.1 降水分布与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成

本区大部分的降水都集中于 5 月至 9 月植物生长季期间。从图 1 可知, 2018 年植物生长季的降水量为 344.2 mm, 占全年总降水量 (392.7mm) 的 87.7%。在植物生长季, 大气温度变化范围为 2.3—18.6℃。降水的

$\delta^{18}\text{O}$ 值在 -16.34‰ — 4.22‰ , 平均值为 -7.95‰ , 平均最高值 ($-4.17\text{‰} \pm 3.18\text{‰}$) 出现在 6 月, 而平均最低值 ($-11.60\text{‰} \pm 4.58\text{‰}$) 出现在生长季末期的 9 月。

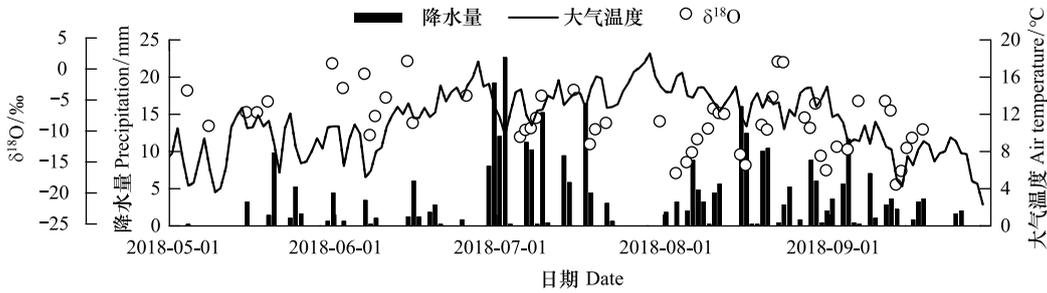


图1 研究区降水量、大气温度和降水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成

Fig.1 Seasonal variations of precipitation amount, air temperature, and isotopic compositions

3.2 土壤水分及其 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成在不同地貌部位的分布特征

土壤含水量的季节变化特征表明(图2),各地貌部位在7月的土壤含水量最高(3.45 ± 0.81)%,9月次之(3.04 ± 1.14)%,8月最低(2.33 ± 0.97)%。土壤水分在沙丘地貌部位之间具有明显的差异($P < 0.05$),迎风坡的年均土壤含水量为(2.78 ± 0.39)%,丘顶土壤含水量最低(1.82 ± 0.71)%,背风坡的土壤含水量最高(3.42 ± 0.85)%。从图2可知,土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值同样具有季节差异和地貌部位差异,但不同地貌部位间的差异性不显著($P > 0.05$), $\delta^{18}\text{O}$ 值都是6月最高,迎风坡和丘顶都是7月最低,而背风坡是9月最低。

土壤含水量随着深度在不同地貌部位的变化如图3所示,土壤含水量在迎风坡和背风坡的表层20cm增加,随后降低;迎风坡60cm以下较为稳定,而背风坡波动增加,60—80cm土壤含水量最高。而沙丘丘顶的土壤含水量从土壤表层到80cm深度一直呈现减小的趋势,80cm以下土壤含水量稳定在1%左右,最低值出现在100cm左右。土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化表明(图3),各地貌部位的 $\delta^{18}\text{O}$ 随着土壤深度的增加呈现降低趋势,表层20cm的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高,40cm以下相对稳定。

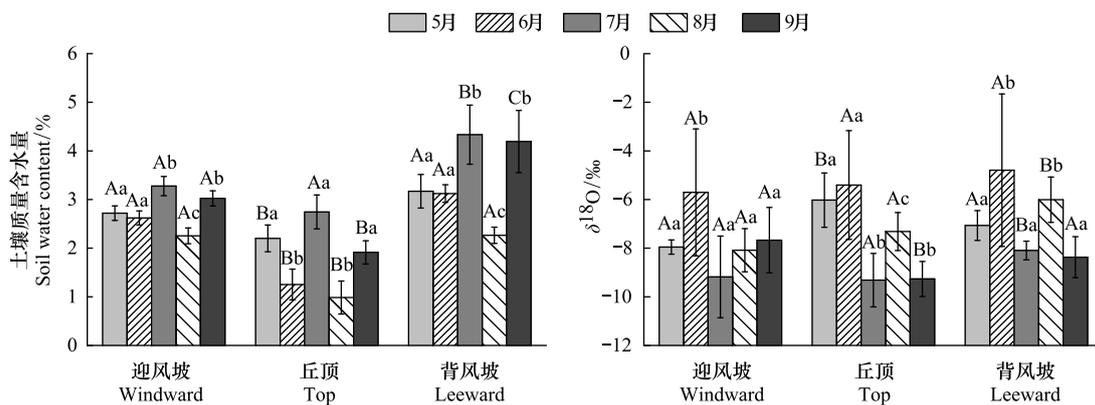


图2 不同地貌部位乌柳群落土壤含水量与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of gravimetric soil water content (SWC) and $\delta^{18}\text{O}$ values in soil water among different topographic positions

不同大写字母表示不同地貌部位在同一季节差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一地貌部位在不同季节差异显著($P < 0.05$)

3.3 植物枝条水的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成变化特征

图4是不同深度土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成随大气降水线(LMWL: $\delta D = 7.72 \delta^{18}\text{O} + 12.2$, $R^2 = 0.959$, $P < 0.01$),大气降水线的斜率和截距接近于全球降水线(GMWL: $\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$),这表明收集到的降水无发生蒸发,截距大于GMWL说明本区降水在很大程度上受地表水和湖水蒸发水汽的影响^[28]。土壤蒸发线(SWL:

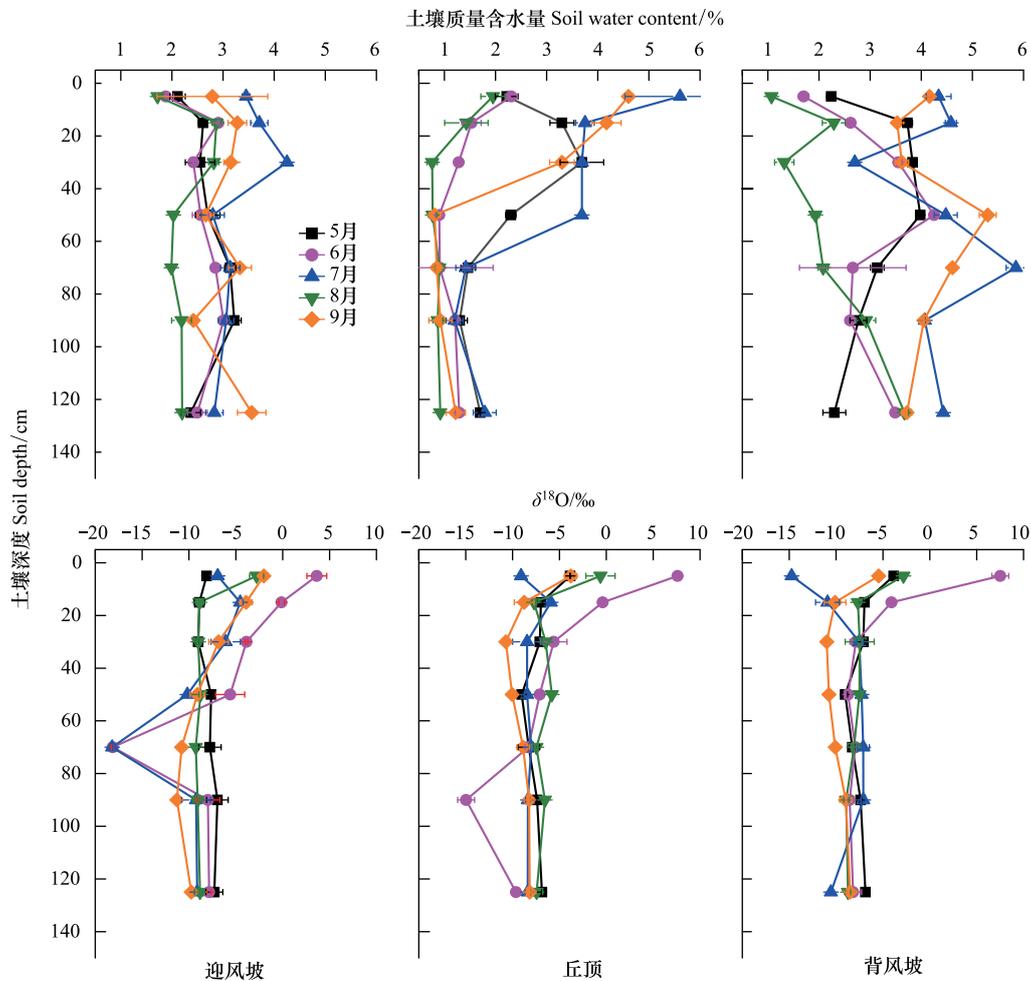


图3 不同地貌部位乌柳群落土壤含水量与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成的垂直变化

Fig.3 Vertical profiles of gravimetric soil water content (SWC) and $\delta^{18}\text{O}$ values at the windward, top and leeward positions during the growing seasons

$\delta D = 6.01 \delta^{18}\text{O} - 17.70$, $R^2 = 0.902$, $P < 0.01$) 位于大气降水线的下方, 土壤水分蒸发线的斜率较小, 表明土壤水分经历了明显的蒸发, 土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素在土壤表层富集。

从图4可知, 乌柳枝条水的 $\delta^{18}\text{O}$ 围绕在土壤水周围, 这表示乌柳主要利用不同深度层次的土壤水。随着降水的季节变化, 乌柳枝条水的 $\delta^{18}\text{O}$ 也出现先增加后减小的变化趋势(图5), 6月最大, 9月最小, 与土壤水和降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势一致, 但在地貌部位间不具有明显的差异($P > 0.05$)。

3.4 植物的潜在水源贡献率

从图6可知, 青海湖湖东沙丘生长的乌柳利用3个潜在的水源。迎风坡的乌柳在生长季初期的5月主要利用60cm以下的土壤水(50.28 ± 18.11)%, 生长旺盛期的7月60cm以上的土壤为主要吸水层, 到生长季末期的9月又转而利用中层和深层土壤水。丘顶的乌柳在生长季初期的5月主要利用20cm以上的土壤水, 利用比例为(79.96 ± 7.59)%; 7月仍然较多利用地表20cm的土壤水(45.16 ± 20.14)%, 但进入9月, 丘顶的乌柳转而主要利用深层60—150cm的土壤水。背风坡的乌柳在生长季初期以表层土壤水为主要来源, 利用比例为(53.47 ± 6.47)%; 生长旺盛期的7月却利用20cm以下的土壤水(72.38%), 而到了生长季末期, 又更多利用表层20cm的土壤水(42.57 ± 18.78)%。由此可见, 不同地貌部位的乌柳在不同生长季的利用水源不同, 生长季初期(5月), 迎风坡的乌柳以深层土壤水为主要水源, 而丘顶和背风坡的乌柳更多地利用表层土壤水; 生长旺盛期(7月), 迎风坡乌柳利用中层20—60cm的土壤水, 丘顶的乌柳主要利用表层土壤水, 而背风坡的乌柳以

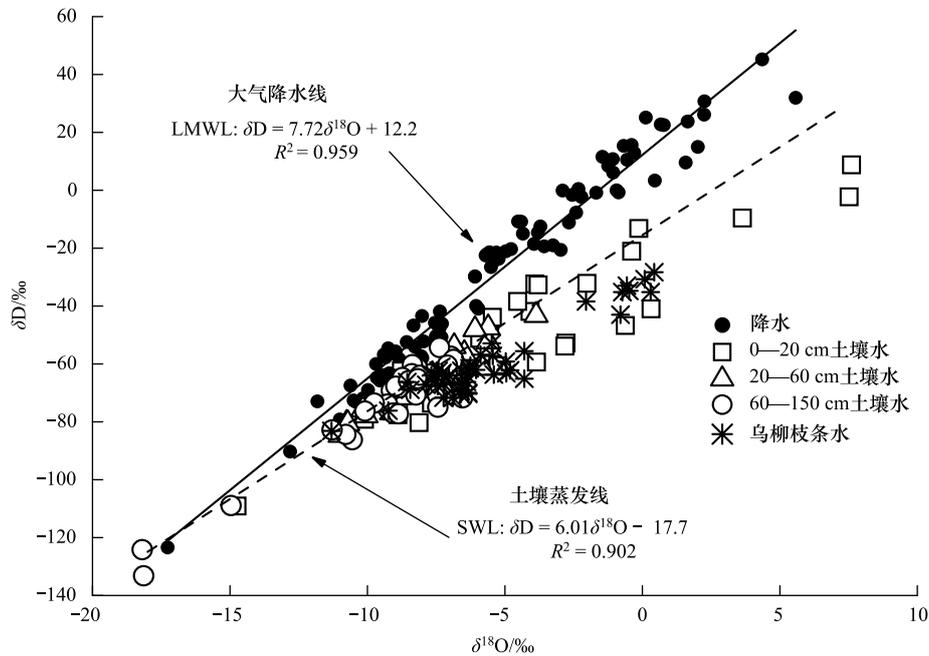


图 4 青海湖东克土沙地大气降水、土壤水和植物枝条水中 δD 与 δ18O 的线性关系

Fig.4 Linear regression relationship between δD and δ18O in precipitation, soil water and xylem water at the experimental site, as shown with the local meteoric water line (LMWL with black line) and the soil water line (SWL with dashed grey line)

深层土壤水为主要水源;生长季末期(9月),迎风坡的乌柳仍以中层土壤水利用较多,丘顶的乌柳转而利用深层土壤水,而背风坡的乌柳却以表层土壤水作为主要水源。

4 讨论

4.1 土壤水分在沙丘地貌部位的差异性

土壤含水量在沙丘迎风坡、丘顶和背风坡的分布具有明显差异性 ($P < 0.05$)。背风坡的土壤含水量最高 ($3.42 \pm 0.85\%$),迎风坡次之 ($2.78 \pm 0.39\%$),丘顶最低 ($1.82 \pm 0.71\%$)。土壤含水量易受到地形、土壤质地及植被等的影响^[29-30],地形的表现主要是坡度引起的空间变化,一般认为坡度较陡的区域的土壤含水量低于较平缓的坡地^[30],也就意味着理论上迎风坡土壤水分高于背风坡,但在沙漠地区的沙丘上,迎风坡的风沙活动比背风坡更为强烈^[30-32],从而导致土壤颗粒产生明显的分异性,迎风坡土壤颗粒较粗,背风坡颗粒较细^[33]

(表 2)。土壤含水量与土壤质地关系的研究表明,土壤含水量与粘粒的含量成正相关,与粗砂的含量成负相关^[34],对比表 2 可知,迎风坡的粘粒含量 ($0.27 \pm 0.09\%$) 低于背风坡 ($0.29 \pm 0.14\%$) 且粗砂含量 ($7.86 \pm 1.35\%$) 高于背风坡 ($7.69 \pm 5.64\%$)。此外,植被通过密度和盖度等方面影响土壤水分的分布^[30],结合表 1 可知,三个部位植被的高度和冠幅具有明显的差异 ($P < 0.05$),但是盖度无差异 ($P > 0.05$),说明植被对土壤含水量的影响较小,但不同地貌部位的植株个体对水分的需求可能存在差异性。土壤水分在高寒半干旱沙地半固定沙丘不同地貌的分布模式与中国其他干旱区半固定沙丘土壤水分的分布模式具有一致性^[35-37]。

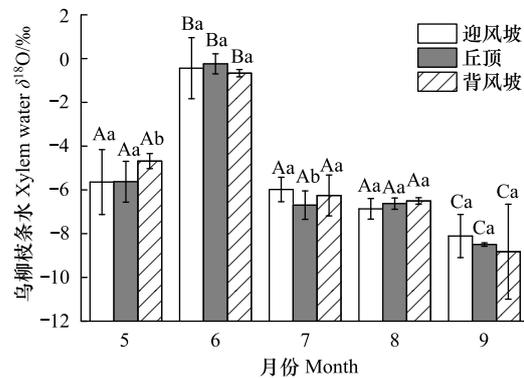


图 5 不同地貌部位乌柳枝条水 δ18O 的季节变化

Fig.5 Seasonal variation in the mean δ18O values of the xylem water at the windward, top and leeward positions in 2018

不同大写字母表示不同地貌部位在同一季节差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一地貌部位在不同季节差异显著 ($P < 0.05$)

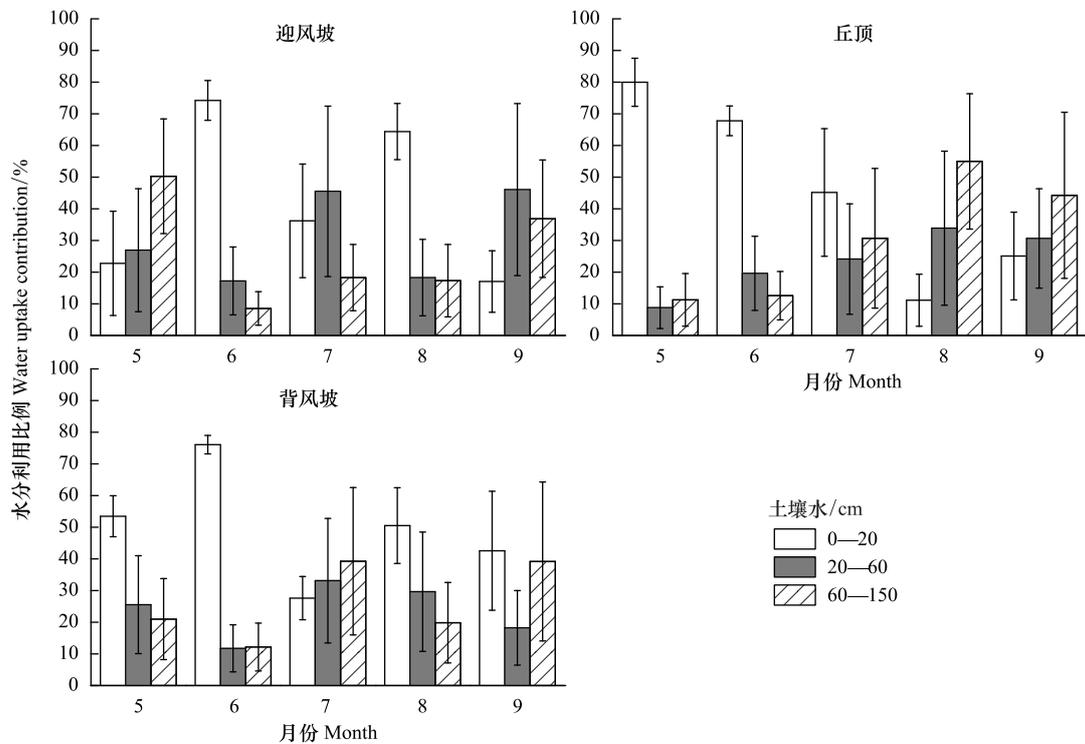


图6 不同地貌部位乌柳的潜在水源贡献比例

Fig.6 Seasonal variations in the fractions of uptake from four potential soil water sources for *S. cheilophila*. Column height represents the mean value of fraction of uptake, and vertical bar represents the range of the maximum and minimum

土壤水分的季节分布主要受到降水的影响^[38],同时,与初始土壤含水量、植被的蒸腾作用和土壤的蒸发作用也有相关性^[29]。通过表1可知,迎风坡植株矮小,丘顶植株高大,背风坡介于两者之间。5月土壤水分较高主要是因为土层解冻后土壤初始含水量增多引起的,在这个阶段,植物开始萌芽,所需水分较少。6月植物进入生长初期,土壤含水量下降,丘顶由于植被的个体最大,所需水分较多,土壤含水量下降最为迅速。7月降水最多,土壤含水量也最高,此时植物开始快速生长所需的水分降水足够补充,不再需要额外消耗深层次的土壤水分。而进入生长最为旺盛的8月,虽然降水仍然较多,但土壤含水量却降至整个生长季的最低值,此时植物蒸腾耗水最多且地表蒸发也最为强烈。相比而言,丘顶的土壤含水量下降最快,说明高大植物的蒸腾耗水最多。9月植物进入生长季末期,而且仍有降水补充,土壤含水量又开始增加至全年次高值。总之,土壤水分的季节变化在不同地貌部位之间的规律较为一致,但植株个体的耗水差异导致土壤含水量具有差异性。

土壤水分的垂直分布受到降水入渗和植物根系吸水的影响^[38]。青海湖湖东沙地降水的入渗深度一般在40cm以内^[40],图3的研究结果印证了这一现象。土壤含水量的分层分布与根系具有密切的关系,根系集中分布层处的土壤含水量较低^[41-42]。于洋等^[19]的研究表明高寒沙地11年生乌柳根系的主要分布深度为0—50cm,细根占剖面的50%以上,根系集中在150cm以上的土层内。迎风坡表层10cm的土层蒸发强烈,根系吸水层主要集中在40—60cm范围内,60cm以下土壤含水量较为稳定,几乎无明显波动;而丘顶的根系在80cm以上的土层都有分布,由于丘顶的植株高大,根系需要向下吸水以补充其强大的蒸腾耗水,丘顶的土壤含水量最低,而且随着深度增加土壤含水量持续减小;背风坡的根系主要集中在20—40cm范围内,土壤含水量随着深度明显增加,尤其是40cm以下。

4.2 降水和土壤水同位素组成的差异

在沙漠地区,植物生长季的降水波动性可以通过土壤水分的季节变化来反映^[43]。降水是荒漠植物可利用的最初水源,它决定着干旱环境中植物的存活^[44],但其只有转化为土壤水才被植物吸收利用。降水的稳定

同位素受到水汽来源、水汽输送路径、温度和降水量的共同影响^[14],进而影响土壤水的稳定同位素组成。在研究区,78%以上的降水集中在夏季,降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值受到局地水汽循环的影响^[45],青海湖地区的大气降水是西风环流、东亚季风和局地蒸发水汽(湖面蒸发和土壤蒸发)共同作用的结果^[28]。此外,沙漠地区小降水事件($<5\text{mm}$)较多,大降水事件集中在夏季,降水入渗多。降水入渗后与初始土壤水混合,构成新的土壤水,随着时间的推移,土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素也发生着变化^[46],降水同位素的变化(图1)可以通过土壤剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动变化反映(图2和图3)。

土壤水分是植物利用水分的直接来源,虽然土壤水分来自于大气降水,水文过程比如近期降水或许会改变土壤剖面上的同位素值^[47],但土壤水分对降水的响应有多种方式,这是因为土壤、地形、植被和降水等会引起土壤水分的空间异质性^[48],并且彼此之间有着较为复杂的关系^[49-51]。在水分受限地区,土壤粒度组成通过影响土壤水分的有效利用而引起植被结构格局的变化^[52],比如,同一种植物在粗颗粒土壤中贮存的水分较少^[43]。青海湖湖东沙地地表沉积物以中砂为主^[53],栽植乌柳的沙丘也不例外(表2),本区土壤颗粒比中国北方其他沙地的较粗,这有益于降水的入渗和植物对水分的吸收利用。土壤水分和土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的时间变化受到降水强度、降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、初始土壤含水量和植物物候特征的影响^[54]。从图3可知,土壤含水量及其 $\delta^{18}\text{O}$ 值在表层的差异较大,随着深度变化土壤含水量差异明显,但到40cm深度以下土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值维持在一个相对稳定的水平,这说明土壤水的同位素组成强烈地受到蒸发和降水再分配的影响^[55]。土壤表层的蒸发强烈,随着土壤深度增加,蒸发减弱^[56],这意味着表层土壤的同位素值高而含水量低。土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在不同地貌部位无明显变化,6月最高,表层20cm值为正(图3),此时植株高度和叶面积指数都很低,土壤裸露于高辐射大气环境下,从而表层同位素受强烈的富集作用。7月,虽然地表蒸发强烈,但降水也多,在乌柳冠层的遮挡下,地表蒸发作用小于降水入渗作用。地表10cm土壤的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低,这主要是受到降水的影响,青海湖流域的降水同位素组成具有显著的降水量效应^[28]。

4.3 乌柳水分利用来源的季节差异

植物的水分来源具有明显的季节变化,这表明植物在生长季的不同阶段利用不同深度的土壤水(图6)。已有研究表明,植物对水分的利用主要受控于根系深度分布和土壤含水量的影响^[57]。春季(5月),青海湖湖东沙地风沙活动强烈,迎风坡在强劲西风的作用下,表层20cm土壤含水量低,乌柳利用深层60cm以下的土壤水维持其发芽生长需求,而丘顶和背风坡的表层土壤含水量较高(图3),足够支持植物初期生长需要。因此,迎风坡的乌柳以深层土壤水为主要水源,而丘顶和背风坡的乌柳更多地利用表层土壤水。进入生长旺盛季的7月,植物蒸腾耗水增多,但此时降水也多,降水入渗补充明显,土壤含水量处于全年最高值。不同地貌部位的乌柳的可利用主要水源与乌柳所处部位的土壤含水量呈正相关(图3)。迎风坡乌柳此时主要利用中层20—60cm的土壤水,通过图3可知,迎风坡乌柳下方的土壤含水量的最高值处于20—60cm土层深度。丘顶的乌柳植株高大,主要利用降水补充最为明显的表层20cm的土壤水,随着土层深度的增加,丘顶的土壤含水量明显减小。而背风坡的乌柳以深层土壤水为主要水源,这是因为背风坡的土壤水分主要储存在60cm以下的深度。秋季(9月),降水减少,乌柳的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显减小,植物开始凋萎,蒸腾耗水减少,地表蒸发减弱,植物对水分的利用比例与土壤水分呈现负相关的关系,此时植物对水分的利用主要与植物根系的分布格局和活动根系区有关^[18,58-61]。由此可知,不同地貌部位的乌柳在不同生长季利用不同层次的土壤水作为其水分来源,这与局地地形影响下的土壤含水量、降水的季节变化和植物根系的分布有关。

在高寒沙地,已有研究表明沙丘灌木主要利用不同深度的土壤水^[62-63]。本研究表明不同地貌部位的乌柳在生长季的不同阶段,利用不同层次的土壤水,这表明沙丘微地貌不仅通过风沙活动、土壤性质影响植被生长,而且通过植物的水分利用影响植被的生长。青海湖地区的气候向着暖湿化发展,暖有利于高寒植物对水分利用效率的增加,湿可促进表层土壤含水量的增加,促使沙地植物对浅层土壤水分的最大化利用,从而减少干旱胁迫对沙地固沙灌木的影响,促进沙地生态系统良性发展。那么,暖湿化背景下,不同类型、不同栽植模式的人工固沙植物对水分的利用模式如何,将会是我们下一步的研究重点。

5 结论

在高寒半干旱沙地,降水及其稳定同位素组成具有明显的季节变化,从而引起植物水和土壤水分及其稳定同位素随着季节的波动变化。沙丘微地形下,植物的生长特征、根系分布特征及其下方的土壤粒度特征和土壤水分都具有空间异质性,在这几个因素的共同作用下,不同沙丘地貌部位的乌柳对土壤水分的利用层次存在着较为明显的季节差异。在春季,迎风坡的乌柳以深层土壤水为主要水源,而丘顶和背风坡的乌柳更多地利用表层 20cm 的土壤水。进入夏季,迎风坡的乌柳利用中层 20—60cm 土壤水,丘顶的乌柳主要利用表层土壤水,而背风坡的乌柳以深层 60—150cm 土壤水为主要水源。到了秋季,迎风坡的乌柳仍以中层土壤水利用较多,丘顶的乌柳转而利用深层土壤水,而背风坡的乌柳却以表层土壤水作为主要水源。因此,在沙地植被恢复中,可依据植物根系分布深度,在不同地貌单元设置不同的植株栽植深度,以期最大化利用不同深度的土壤水分。

参考文献 (References):

- [1] D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, Ravi S, Runyan C W. Global desertification: drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 326-344.
- [2] Sperry J S, Hacke U G. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. *Function Ecology*, 2002, 16(3): 367-378.
- [3] Qi Y B, Chen T, Pu J, Yang F Q, Shukla M K, Chang Q R. Response of soil physical, chemical and microbial biomass properties to land use changes in fixed desertified land. *CATENA*, 2018, 160: 339-344.
- [4] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(2): 1073-1082.
- [5] 李小雁. 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*, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [6] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, Gao Y H, Liu L C, Wang X P. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of Northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert. *Science China Life Sciences*, 2014, 57(5): 539-548.
- [7] Lin G H, Sternberg L D S L. Utilization of surface water by red mangrove (*Rhizophora mangle* L.): an isotopic study. *Bulletin of Marine Science*, 1994, 54(1): 94-102.
- [8] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 93-107.
- [9] Ryel R J, Ivans C Y, Peek M S, Leffler A J. Functional differences in soil water pools: a new perspective on plant water use in water-limited ecosystems//Lüttge U, Beyschlag W, Murata J, eds. *Progress in Botany*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008: 397-422.
- [10] Ward D, Wiegand K, Getzin S. Walter's two-layer hypothesis revisited: back to the roots! *Oecologia*, 2013, 172(3): 617-630.
- [11] Rossatto D R, de Carvalho Ramos Silva L, Villalobos-Vega R, da Silveira Lobo Sternberg L, Franco A C. Depth of water uptake in woody plants relates to groundwater level and vegetation structure along a topographic gradient in a Neotropical savanna. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 77: 259-266.
- [12] Song L N, Zhu J J, Zhang J X, Zhang T, Wang K, Wang G C, Liu J H. Effect of drought and topographic position on depth of soil water extraction of *Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv. Trees in a semiarid sandy region, Northeast China. *Forests*, 2019, 10(5): 370.
- [13] Zhang C C, Li X Y, Wu H W, Wang P, Wang Y, Wu X C, Li W, Huang Y M. Differences in water-use strategies along an aridity gradient between two coexisting desert shrubs (*Reaumuria soongorica* and *Nitraria sphaerocarpa*): isotopic approaches with physiological evidence. *Plant and Soil*, 2017, 419(1/2): 169-187.
- [14] Dai Y, Zheng X J, Tang L S, Li Y. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert. *Plant and Soil*, 2015, 389(1/2): 73-87.
- [15] Rosenthal D M, Ludwig F, Donovan L A. Plant responses to an edaphic gradient across an active sand dune/desert boundary in the Great Basin Desert. *International Journal of Plant Sciences*, 2005, 166(2): 247-255.
- [16] Grigg A M, Veneklaas E J, Lambers H. Water relations and mineral nutrition of closely related woody plant species on desert dunes and interdunes. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 27-43.
- [17] Xu H, Li Y, Xu G Q, Zou T. Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in

- summer precipitation. *Plant, Cell & Environment*, 2007, 30(4): 399-409.
- [18] Tiemuerbieke B, Min X J, Zang Y X, Xing P, Ma J Y, Sun W. Water use patterns of co-occurring C₃ and C₄ shrubs in the Gurbantonggut desert in northwestern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 341-354.
- [19] 于洋, 贾志清, 朱雅娟, 赵淑伶, 刘海涛, 李清雪, 魏登贤. 高寒沙地乌柳(*Salix cheilophila*)林根系分布特征. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 67-74.
- [20] Yu Y, Jia Z Q. Changes in soil organic carbon and nitrogen capacities of *Salix cheilophila* Schneid along a revegetation chronosequence in semi-arid degraded sandy land of the Gonghe Basin, Tibet Plateau. *Solid Earth*, 2014, 5(2): 1045-1054.
- [21] 朱雅娟, 赵雪彬, 刘艳书, 李蕴, 范文秀. 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*, 2017, 37(2): 281-287.
- [22] 田丽慧, 张宏巍, 吴汪洋, 张登山. 高寒沙区乌柳高秆深栽固沙技术. *林业实用技术*, 2014, (6): 26-28.
- [23] 汪海娇, 田丽慧, 张登山, 吴汪洋, 张明远, 张宏巍, 王俏雨, 周鑫. 青海湖东岸沙地风沙活动特征. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 49-56.
- [24] 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 张明远, 周鑫. 近10年青海湖东沙地人工植被群落特征. *生态学报*, 2019, 39(6): 2109-2121.
- [25] 张登山, 高尚玉, 石蒙沂, 哈斯, 严平, 鲁瑞洁. 青海高原土地沙漠化及其防治. 北京: 科学出版社, 2009: 28-28.
- [26] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [27] Snyder K A, Williams D G. Defoliation alters water uptake by deep and shallow roots of *Prosopis velutina* (Velvet Mesquite). *Function Ecology*, 2003, 17(3): 363-374.
- [28] Wu H W, Li X Y, Zhang J M, Li J, Liu J Z, Tian L H, Fu C S. Stable isotopes of atmospheric water vapour and precipitation in the Northeast Qinghai-Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, 2019, 33(23): 2997-3009.
- [29] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. *Journal of Hydrology*, 1983, 62(1/4): 179-200.
- [30] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1/4): 259-281.
- [31] 哈斯, 董光荣, 王贵勇. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面气流与坡面形态的关系. *中国沙漠*, 1999, 19(1): 1-5.
- [32] 王广涛, 王训明, 郎丽丽. 毛乌素沙地南缘半固定沙丘风沙输移物特征. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 281-286.
- [33] 张春来, 郝青振, 邹学勇, 严平. 新月形沙丘迎风坡形态及沉积物对表面气流的响应. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 359-363.
- [34] Pan Y X, Wang X P. Factors controlling the spatial variability of surface soil moisture within revegetated-stabilized desert ecosystems of the Tengger Desert, northern China. *Hydrological Processes*, 2009, 23(11): 1591-1601.
- [35] 吕贻忠, 胡克林, 李保国. 毛乌素沙地不同沙丘土壤水分的时空变异. *土壤学报*, 2006, 43(1): 152-154.
- [36] 赵文智, 刘志民, 常学礼. 奈曼沙区植被土壤水分状况的研究. *干旱区研究*, 1992, 9(3): 40-44.
- [37] 伍永秋, 张健枫, 杜世松, 哈斯额尔敦, 黄文敏. 毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1612-1619.
- [38] Berndtsson R, Chen H S. Variability of soil water content along a transect in a desert area. *Journal of Arid Environments*, 1994, 27(2): 127-139.
- [39] 冯起, 高前兆, 苏培玺, 张小由. 半湿润地区植被影响下的沙地水分动态. *干旱区研究*, 1994, 11(4): 58-63.
- [40] 鲁瑞洁, 唐清亮, 魏殿生, 张登山. 青海湖湖东沙地不同沙丘降雨入渗研究. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 797-803.
- [41] 王翔宇, 张进虎, 丁国栋, 孙保平, 高函, 张宇清, 吴斌, 曹波. 沙地土壤水分特征及水分时空动态分析. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 222-227.
- [42] 石莎, 马风云, 刘立超, 周宜君, 冯金朝. 沙坡头地区不同植被结构对沙地土壤水分的影响. *中央民族大学学报: 自然科学版*, 2004, 13(2): 137-141, 145-145.
- [43] Porporato A, D'Odorico P, Laio F, Ridolfi L, Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(8/12): 1335-1348.
- [44] Schwinning S, Sala O E, Loik M E, Ehleringer J R. Thresholds, memory, and seasonality: Understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 191-193.
- [45] Cui B L, Li X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2015, 527-528: 26-37.
- [46] 周海, 赵文智. 河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的稳定同位素分析. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1637-1645.
- [47] Tang K L, Feng X H. The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(3/4): 355-367.
- [48] Alaoui A, Caduff U, Gerke H H, Weingartner R. Preferential flow effects on infiltration and runoff in grassland and forest soils. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(1): 367-377.
- [49] Kulasekera P B, Parkin G W. Influence of the shape of inter-horizon boundary and size of soil tongues on preferential flow under shallow

- groundwater conditions: a simulation study. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(2): 211-221.
- [50] Kienzler P M, Naef F. Subsurface storm flow formation at different hillslopes and implications for the 'old water paradox'. *Hydrological Processes*, 2008, 22(1): 104-116.
- [51] Zehe E, Sivapalan M. Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geo-ecosystems; Manifestations, controls, implications. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1273-1297.
- [52] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 25-51.
- [53] 张登山, 田丽慧, 鲁瑞洁, 唐清亮, 石昊. 青海湖湖东沙地风沙沉积物的粒度特征. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 203-211.
- [54] Xu Q, Liu S R, Wan X C, Jiang C Q, Song X F, Wang J X. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(25): 3800-3809.
- [55] Allison G B. The relationship between ^{18}O and deuterium in water in sand columns undergoing evaporation. *Journal of Hydrology*, 1982, 55(1/4): 163-169.
- [56] Gaziz C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 2004, 119(1/2): 97-111.
- [57] Pan Y X, Wang X P, Ma X Z, Zhang Y F, Hu R. The stable isotopic composition variation characteristics of desert plants and water sources in an artificial revegetation ecosystem in Northwest China. *CATENA*, 2020, 189: 104499.
- [58] Ogle K, Wolpert R L, Reynolds J F. Reconstructing plant root area and water uptake profiles. *Ecology*, 2004, 85(7): 1967-1978.
- [59] Martín-Gómez P, Barbeta A, Voltas J, Peñuelas J, Dennis K, Palacio S, Dawson T E, Ferrio J P. Isotope-ratio infrared spectroscopy: a reliable tool for the investigation of plant-water sources? *New Phytologist*, 2015, 207(3): 914-927.
- [60] Wang J, Fu B J, Lu N, Wang S, Zhang L. Water use characteristics of native and exotic shrub species in the semi-arid Loess Plateau using an isotope technique. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 276: 55-63.
- [61] Zhou H, Zhao W Z, He Z B, Yan J L, Zhang G F. Variation in depth of water uptake for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* along a precipitation gradient in sandy regions. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123921.
- [62] Jia Z Q, Zhu Y J, Liu L Y. Different water use strategies of juvenile and adult *Caragana intermedia* plantations in the Gonghe Basin, Tibet Plateau. *PLoS One*, 2012, 7(9): e45902.
- [63] Wu H W, Li X Y, Jiang Z Y, Chen H Y, Zhang C C, Xiao X. Contrasting water use pattern of introduced and native plants in an alpine desert ecosystem, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 182-191.