

DOI: 10.5846/stxb201406231300

吴华武, 李小雁, 蒋志云, 李静, 郑肖然, 赵殿智. 基于 δD 、 $\delta^{18}O$ 的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究. 生态学报, 2015, 35(24): - .
Wu H W, Li X Y, Jiang Z Y, Li J, Zheng X R, Zhao D Z. Variations in water use for *Achnatherum splendens* in Lake Qinghai watershed, based on δD and $\delta^{18}O$. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

基于 δD 、 $\delta^{18}O$ 的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究

吴华武^{1,*}, 李小雁¹, 蒋志云¹, 李 静^{2,3}, 郑肖然¹, 赵殿智⁴

1 北京师范大学 资源学院, 北京 100875

2 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 青海省三角城种羊场, 刚察 812300

摘要:水分条件是限制干旱半干旱地区植物生长重要的生态因子,为了揭示青海湖流域典型生态系统下芨芨草植物的水分利用来源及其如何响应水分条件的变化,选择了自然和干旱控制条件下芨芨草植物,通过测定芨芨草植物茎水和各潜在水源(土壤水、地下水及降水)中 δD 、 $\delta^{18}O$ 组成,并利用直接比较分析法和多源混合模型计算芨芨草植物对土壤水的利用比例。研究结果表明:表层土壤水分和土壤水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值表征出较大波动范围,其直接受降水和蒸发作用影响,土壤蒸发线的斜率和截距明显小于大气水线斜率和截距,表明土壤水中同位素组成经历了强烈的蒸发分馏过程,而芨芨草茎水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值都集中分布土壤水蒸发线附近,说明芨芨草根系主要利用不同深度的土壤水。自然条件下芨芨草在生长季初期(6月)利用表层土壤水(0—10cm, 45.1%), 8—9月份大降水事件影响土壤含水量和同位素组成,降水入渗深度较深且芨芨草根系对土壤水分吸收的比例相差不大,表明根系在土壤含水量较高时均能吸水不同深度土壤水。在干旱控制条件下芨芨草在7月初主要利用表层土壤水(0—30cm),随着表层土壤水分的减少,根系吸收深度转向较深土壤层,而灌溉后表层土壤水分明显增加,其吸收深度又转向表层,表明芨芨草根系吸收深度能敏感地响应土壤水分的变化。另外还发现芨芨草在生长季内并未直接利用地下水。

关键词:氢氧稳定同位素;降水;土壤水;芨芨草;水分利用来源;青海湖流域

Variations in water use for *Achnatherum splendens* in Lake Qinghai watershed, based on δD and $\delta^{18}O$

WU huawu^{1,*}, LI Xiaoyan¹, JIANG Zhiyun¹, LI Jing^{2,3}, ZHENG Xiaoran¹, ZHAO Dianzhi⁴

1 College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Sanjiaocheng Sheep Breeding Farm, Gangcha 812300, China

Abstract: Water availability is a key ecological factor for plant growth in arid and semi-arid regions. We identified the characteristics of water-uptake patterns by *Achnatherum splendens* and how it responds to changes in water conditions in typical steppe ecosystem (Lake Qinghai watershed). We analyzed stable isotopes of plant stem water and potential water sources including soil water, groundwater, and precipitation via direct comparison with differences among potential water sources and a multi-source mixing model calculating the plant-use proportions from diverse soil depths under natural and

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41130640);长江学者和创新团队计划“土壤水文与土壤侵蚀”(批准号:IRT1108)中央高校基本科研业务费专项资助

收稿日期:2014-06-23; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuhuawu416@163.com

drought treatment areas. The results showed that there were large fluctuations in the soil moisture (δD) and the isotopic contents ($\delta^{18}O$) of soil water in the surface soil layers, directly influenced by precipitation and evaporation. The slope and intercept of the evaporative soil water line were evidently smaller than those of the meteoric water line, indicating that the isotopic contents from soil water experienced stronger evaporation fractionation processes. The isotopic contents (δD and $\delta^{18}O$) of the stem were scattered along the evaporative soil water line indicating that the possible water sources were extracted from diverse soil water depths. *A. splendens* absorbed mainly surface soil water (the proportion from 0—10cm was 45.1% in June) at the early growth stage. Large precipitation events significantly affected the soil water content and isotopic contents and infiltrated into deep soil layers. Differences in plant water use proportions were minimal during August and September, which revealed that the roots of *A. splendens* extracted water from various depths when soil water availability was high. Under the drought treatment conditions, *A. splendens* used mostly surface soil water (0—30 cm) in early July. The absorption water depth shifted to deep soil layers when the surface soil became drier. However, the absorption depth again shifted from deep to surface soil layers when surface soil moisture sharply increased after irrigation. Groundwater was not a main water source for *A. splendens* during the growing season.

Key Words: Stable isotopes; Precipitation; Soil water; *Achnatherum splendens*; Water-use sources; Lake Qinghai watershed

芨芨草系多年生密丛性禾本科植物,它既是优良饲养植物、纤维植物,又具有良好的水土保持功能,广泛地分布于我国干旱半干旱地区如内蒙古高原、黄土高原、青藏高原东部地区(共和盆地、青海湖盆地及柴达木盆地)^[1-2],芨芨草在青海湖盆地呈环带状分布,占整个青海湖流域面积(29 960 km², 2005)的三分之一,多生长于海拔高度在 2900—3400m 之间、开阔平坦的湖积平原、河谷阶地和山前缓坡。目前,在气候变化和人类活动的影响下芨芨草草原生态系统遭到严重破坏,面积急剧减小、生态环境恶化,从而导致草地生产力下降,物种多样性也发生变化^[3-4]。目前,大量研究主要集中在芨芨草草原生态系统的物种多样性、空间分布格局及生态效益功能^[4-6]。研究发现经围栏封育后芨芨草群落的物种多样性及空间分布格局在围栏内外具有明显的差别,且围栏内生态环境得到有效地改善^[6]。然而,水分条件是限制芨芨草草原生态系统植物生长发育的关键因子,降水是该生态系统的主要水分补给来源,而降水、土壤水和地下水是芨芨草的主要可能利用水源,尽管芨芨草草原生态系统降水以小降水事件(<5mm)为主,这不稳定的降水被其高效率地利用,如研究发现干旱区多年生深根系植物具有一定的可塑性功能,而一年生浅根系植物能高效地利用短期不稳定的降水以避免干旱胁迫^[7]。在水分相对短缺和降水时空分配不均的芨芨草草原生态系统,确定芨芨草水分利用策略对全面认识其生长发育与生态功能及评价其对整个青海湖流域的水资源尤其重要。到目前为止,国内外对芨芨草水分利用的方式和机理还尚缺。

稳定同位素技术在植物与水分关系研究中已成为强有力的示踪工具,且已在一定程度上替代了传统方法(如挖掘法、植物生理生态等)^[8-9]。稳定氢氧同位素组成不仅可示踪水循环过程,还可确定不同植物间的水分利用关系,这为认识生态系统水文及物质循环过程提供新的途径。植物通过根系吸水及水分在植物体内运输过程中同位素组成不会发生分馏现象,因此植物组织内稳定同位素组成是不同水源(地表水、地下水、土壤水)的综合反映^[8],从而有效地辨别和区分植物水分利用水源。但 Asbjornsen 等指出如果不同土壤水中同位素信息组成具有高度相似性,这增加辨别植物水分利用水源的难度^[9],但可结合植物根系分布特征、土壤含水量和土壤水势来准确地识别植物的水分利用来源^[10]。

Walter's 首次提出在干旱半干旱地区植物水分利用方式普遍具有两层水分利用模式假设(two-layer model hypothesis)^[11],即深根系木本植物(乔木或灌木)利用稳定的深层水源(地下水、深层土壤水)而浅根系草本植物(多年生或一年生)依靠表层不稳定的水源(表层土壤水、降水)^[11-12]。大量研究发现干旱半干旱环境下的荒漠树木(如杉木、槭树林)的水分利用策略与两层水分利用模式相似,深根性植物依靠稳定的水源^[11-12]。

但 Le Roux 等和 Liu 等发现无论深根还是浅根系植物都主要依赖于表层土壤水^[13-14]。而芨芨草根系发达、入土较深且以须根为主,根系最大深度能达到 1.5m^[15]。经野外调查发现该研究区芨芨草深度最深深度达到 1.6m 以下,这可能与地下水潜水位接近,因此芨芨草植物往往被作为当地牧民地下水的指示植物,芨芨草根系分布特征与不同水分条件下其水分利用方式关系及地下水是否真正能被芨芨草所利用目前尚不明确。鉴于此,本文选择青海湖流域沙柳河下游的芨芨草植物为研究对象,利用稳定同位素技术对生长季内其水分利用来源进行初步探讨,从而揭示芨芨草水分利用来源的季节变化及其对土壤水分条件的响应关系,为合理地解释优势物种芨芨草的水分利用机理及适应极端干旱环境的策略,将为退化的芨芨草原生态系统的恢复与重建提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海湖流域沙柳河下游地区三角城种羊场内的芨芨草原(图 1),在 20 世纪 80 年代芨芨草原开始被围栏封育,主要作为牧民的冬季和春季牧场。在沙柳河下游地区植被类型以芨芨草原、河谷灌木具鳞水柏枝及农田生态系统(青稞、燕麦、油菜)分布为主,芨芨草原植物群落以芨芨草斑块为中心周围主要分布着冷蒿、羊草、早熟禾、唐古韭、本氏针茅等植物。土壤为栗钙土,土壤容重为 1.21 g cm^{-3} ,土壤粘粒含量 34.8%—45.3%,浅层土壤田间持水量 29.7%—32%^[16]。其深居内陆,属于高原大陆性气候,气温较低,太阳辐射强烈、气温日差较大,且大部分区域常年处于寒冷、干旱少雨、多风的气候条件下,寒冷季节漫长,而温暖季节相对短暂,四季不分明。降水量稀少且主要集中在 5—9 月,蒸发量大,年平均降水量在 291—579 mm 之间,年蒸发量达到 1200—2000 mm,最大冻土深度为 2.88 m。

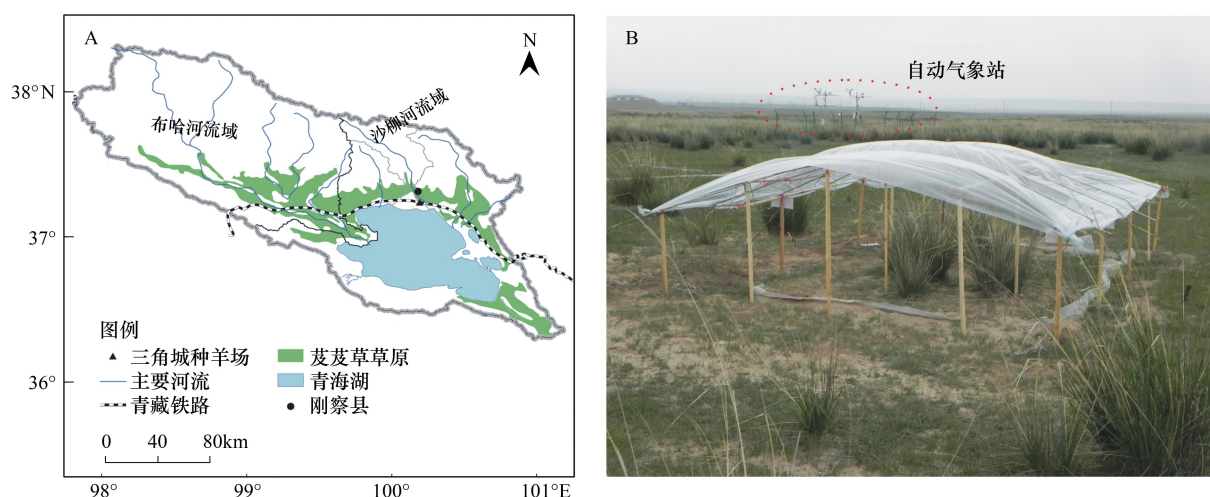


图 1 青海湖流域芨芨草原的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of typical *Achnatherum splendens* steppe in Lake Qinghai watershed

1.2 样品收集及实验设计

在研究区内选择固定的芨芨草斑块 3 丛,采集芨芨草植物地下根茎部分,将芨芨草根茎样本切成小段(4—5 cm)装入 30 ml 的玻璃瓶中并用 Parafilm 封口膜密封并放入便携式的冰箱,用于植物水稳定同位素(δD)组成分析芨芨草的水分利用来源。同时,在其附近用土钻收集不同深度的土壤样品(0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—60 cm),每层三个重复,将土壤样品分成两组,一组装入 30 ml 的玻璃瓶中并用 Parafilm 封口膜密封并放入便携式的冰箱,另一组装入自封袋中用烘干法测定土壤重量含水量。所有样品带入实验室内在 -4°C 下冷藏直至室内抽提分析。

自 2013 年 4 月 28 日至 9 月 28 日,在实验站三角城种羊场利用自制装置收集每次降水事件的样品,共 52

个次降水样,且每次降水事件收集时间都与安装在芨芨草草原的自动气象站观测(Campbell Scientific, Inc., USA)同步,记录时间间隔为 10 min。其中,液态降水直接注入采样瓶(30 ml)中;固态降水(雪或冰雹)先装入水样袋内,扎紧口袋,待其在室温下融化后再倒入 30 ml 采样瓶中密封保存。在每次收集植物及土壤样时,地下水样取自离采样点约 0.5 km 处饮水井且井水深度不超过 2.7 m。所有水样均在 -4°C 下冷藏。

实验时间集中植物的生长季(6—9 月)进行,为了更好地揭示优势植物芨芨草对土壤水分条件的响应关系,我们进行了为期近一个月(7 月 5 日至 8 月 1 日;7 月 5 日、7 月 8 日、7 月 18 日、7 月 23 日、7 月 27 日及 8 月 1 日)的干旱控制实验。在 6 月采样点附近选择芨芨草斑块(6 丛)较密集处,围绕其四周挖沟至 60 cm (60 cm 以下为碎石和砾石),沟壕四周用透明塑料薄膜隔开并将原土填埋以防止土壤水的侧向流动。在所选择的芨芨草斑块正上方用透明塑料薄膜进行遮雨处理,四周保持通风,遮雨面积大小为 3.0 m (长) $\times$ 2.4 m (宽) $\times$ 0.9 m (高)。其中在 7 月 21 日(250 L)和 7 月 31 日(200 L)用来自井水进行两次灌溉分析芨芨草的水分利用响应土壤水分的变化。自然条件下采样时间为 6 月 10 日、7 月 5 日、7 月 18 日、8 月 9 日、8 月 23 日及 9 月 9 日

1.3 样品测定

利用传统的低温真空蒸馏法从植物和土壤样中抽提土壤水和植物水^[17-18]。所有植物样、土壤样和水样中氢氧稳定同位素均在北京师范大学地表过程与资源生态重点实验室完成,利用 LGR 液态同位素分析仪(DLT-100,型号:908-0008)进行测试分析,所有测量结果均为与 VSMOW 同位素浓度的千分差来表示:

$$\delta D(\delta^{18}\text{O}) = (R_{\text{样}} - R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times (1)$$

式(1)中 $R_{\text{样}}$ 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别是水样和标样(V-SMOW)中的氢(或氧)稳定同位素比率($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 或 D/H),其中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试的误差分别为 $\delta\text{D} \leq 2\text{‰}$ (1s), $\delta^{18}\text{O} \leq 0.3\text{‰}$ (1s)。

1.4 数据分析

利用直接对比法和多源混合模型^[19](IsoSource)分析芨芨草根系在生长季内吸收深度,首先根据各水源间同位素变化特征初步判断植物吸水的可能土壤层次;然后,利用多源混合模型(IsoSource)来定量地分析芨芨草对各水源所利用的相对贡献率,模型运行时增幅和质量平衡公差分别设置为 1% 和 0.1%,其中质量平衡公差一般不小于来源增量与各可能水源同位素值之间最大差值的乘积的 1/2。采用 SPSS13.0 中的 Tukey 法对实验数据进行分析,在 0.05 水平上检验其显著性。

2 结果

2.1 降水量、温度及降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征

对降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果(图 2(b))表明,降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 存在较大的波动范围, δD 的波动范围为: $-96.9 - 45.2\text{‰}$,加权平均值为 -38.6‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 的波动范围为 $-14.1 - 4.36\text{‰}$,加权平均值为 -6.71‰ 。其中在 8、9 月份降水中稳定氢氧稳定同位素组成较其他月份贫化,但小降水事件降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现正值的情况,这可能与小降水事件的雨滴在下降过程中受到强烈的蒸发过程^[20-21]。在大降水事件(或雪样)中稳定同位素组成较贫化,这主要与降水的形成过程密切相关^[20-21],如 4 月 28 日(雪: $\delta^{18}\text{O} = -14.1\text{‰}$, $\delta\text{D} = -96.9\text{‰}$)、5 月 17 日(雨夹雪: $\delta^{18}\text{O} = -12.8\text{‰}$, $\delta\text{D} = -90.3\text{‰}$)和 6 月 9 日(雨夹雪: $\delta^{18}\text{O} = -10.4\text{‰}$, $\delta\text{D} = -66.1\text{‰}$) (图 2(b))。

青海湖流域属于我国典型的干旱半干旱、高寒地区,雨热同期,降水主要集中在 5—9 月且占全年的 85% (图 2(a))。2013 年雨季(5—9 月)降水量为 350.6 mm,大降水事件集中在 8 月份,8 月 20 日—23 日期间降水量为 89.4 mm,占雨季的 25.6%,该月降水量在全年中最多,为 129.1 mm(图 2(c))。在 6 月份有三次单场大降水事件(10 mm)(如 6 月 8、9、21 日),而在 7 月份小降水事件($<10\text{ mm}$)分布较多。温度在 $2 - 17^{\circ}\text{C}$ 之间呈现波动变化(图 2(c))。

Craig^[22]首次将大气降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系称为大气水线,它对揭示水循环过程中稳定同位素变

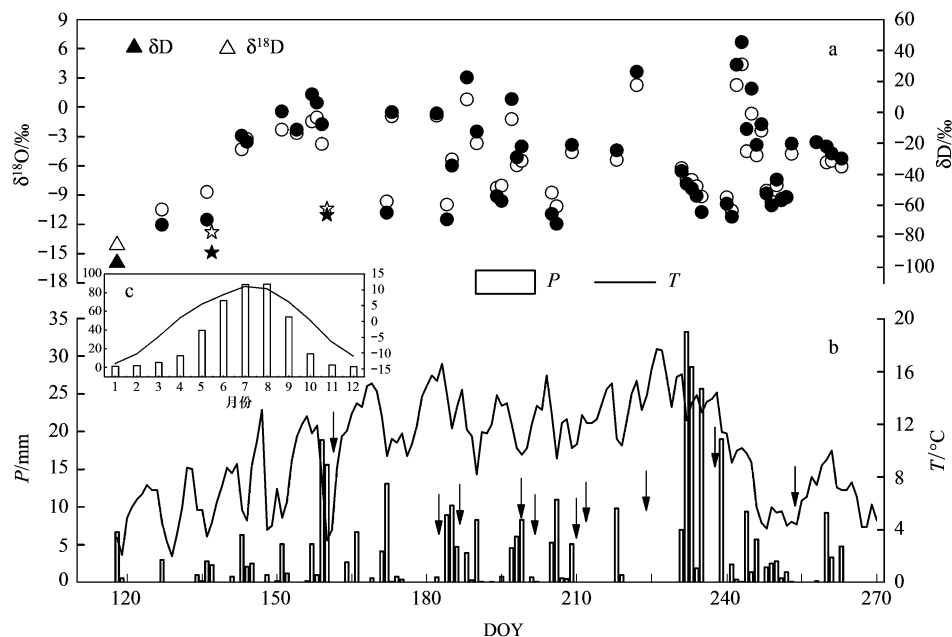


图2 芨芨草草原温度、降水量及降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化特征

Fig. 2 The variation characteristics of air temperature, precipitation amount, δD and $\delta^{18}O$ of precipitation in the *Achnatherum splendens* steppe area

(a: 多年平均降水量和温度(1957—2013); b: δD 和 $\delta^{18}O$; c: 降水量和温度; 三角形表示雪样; 五角星表示雨夹雪样; 箭头表示植物和土壤样采集时间)

化具有重要意义。在全球尺度下,全球大气水线(GMWL)为: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 。不同区域大气水线往往偏离全球大气水线,此能较好地反映出各自降水变化规律。由于大气降水、土壤水、植物水、地下水等在时空尺度上存在着一定的水力联系,将各水体中氢氧稳定同位素组成与当地大气水线进行对比分析具有重要意义。本文对该地区降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 组成进行线性回归分析,得出青海湖流域大气水线方程(LMWL)(图3):

$$\delta D = 8.07 \delta^{18}O + 14.8 \quad (2)$$

该大气水线的斜率和截距与全球水线的相接近。根据在自然条件(式3, LASWL)和干旱控制条件(式4, LCSWL)下土壤水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 组成分析得出两种不同条件下的土壤蒸发线:

$$\delta D = 4.88\delta^{18}O - 21.6 (n = 30, r^2 = 0.849) \quad (3)$$

$$\delta D = 5.14\delta^{18}O - 21.3 (n = 37, r^2 = 0.923) \quad (4)$$

从图3可以看出,土壤水和植物水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 组成都位于大气水线右下方,在两种生境条件下土壤蒸发线的斜率和截距相差不大,分别为4.88和5.14且介于4—6之间,它们明显低于大气水线的斜率和截距,表明土壤水和植物水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 经历了不同程度的二次蒸发分馏效应使得 δD 、 $\delta^{18}O$ 发生富集作用^[17,23-25]。植物茎水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值都围绕土壤水分布(图3),这表明芨芨草主要利用不同深度的土壤水^[13]。

2.2 土壤水分及土壤水中 δD 变化

土壤水分的时空异质性不仅与降水和蒸发作用有关,还与植被对水分吸收利用有关^[26]。从图4可以看出,两种生境条件下土壤水分随时间和深度的变化明显,表层土壤含水量(0—20 cm)变化明显,而深层土壤含水量变化不明显。在自然条件下,表层土壤水分(0—10 cm)在13.2%—34.5%之间波动变化范围明显,在8月9日前有12天无降水事件,干旱时间长,从而土壤水分含量最低。在8月23日和9月9日受降水补给的影响,表层土壤含水量明显增大,其中在8月23日前5天连续降水且降水量大(图2b),降水量达86.3 mm,且降水入渗深度较深,在40cm以上土壤水分受降水影响显著。但在9月9日前有连续11天的降水过程,降水时间长且以小降水事件(<10 mm)为主,土壤水分含量明显比其他时间高。在干旱控制条件下,由于不受外

界降水的影响,土壤水分含量减小明显,在7月5日至18日期间,表层土壤含水量(0—10 cm)从21.5%减少到8.51%(图4(b))。在7月21日和7月31日进行了两次灌溉处理使得在7月23日和8月1日表层土壤含水量增大,但深层土壤水变化不明显。

图4给出了两种生境下土壤水中 δD 的变化特征,浅层土壤水中 δD 变化比深层土壤水中的 δD 变化明显。在自然条件下,表层土壤水(0—10 cm)中 δD 的差异性显著($P < 0.05$),表现出季节性变化特征,在 -14.3 — -51.4‰ 中波动变化,平均值 -29.9‰ 。表层土壤水中稳定同位素值明显比深层富集,因为表层土壤水受到强烈的二次蒸发分馏作用从而使得其较富集于深层土壤水^[23]。但在8月23日和9月9日土壤水中 δD 的变化呈‘S’型变化(图4(a)),表明直接受降水中稳定同位

素组成影响,表层土壤水中 δD 与降水中同位素组成相接近,且土壤水中 δD 在垂直剖面上差异性不大。

在干旱控制条件下,土壤水中稳定同位素组成明显富集于自然条件下,在7月5日至18日期间表层土壤水中 δD 从 -23‰ 增大到 -8.13‰ (图4(b)),同样表层土壤水中稳定同位素组成受到强烈的蒸发作用,但在7月23日和8月1日土壤水中 δD 值较小,其直接受7月21日和7月31日灌溉水的影响,在7月27日表层土壤水中稳定同位素组成经历了二次蒸发分馏作用使得 δD 比7月21日的 δD 更富集。然而,在20cm以下土壤水分同位素差异性较小,这是由于在此深度以下受蒸发作用逐渐减弱。

2.3 芨芨草植物中 δD 变化特征及其对土壤水分利用比例

在两种生境条件下芨芨草植物中稳定氢氧同位素(δD 和 $\delta^{18}O$)组成位于全球大气水线(GMWL)和青海湖流域大气水线(LMWL)右下侧区域(图3),表明植物所利用的水源受到一定程度蒸发作用影响,使得稳定氢氧同位素发生分馏作用而重同位素富集。对两种生境条件下芨芨草茎水中 δD 组成对比分析发现:自然条件下芨芨草茎水在 -18.5 — -40.9‰ 之间波动变化且其介于10—60 cm土壤水之间,平均值为 -31.4‰ ,表明芨芨草在整个生长季内水分可能主要来源于不同深度的土壤水;在干旱控制条件下芨芨草茎水中 δD 的波动变化范围(-16.8‰ — -43.2‰ ,平均值: -31.6‰)比自然条件下的波动范围要大。芨芨草茎水中 δD 组成与地下水 δD 组成存在一定的差异(图4),表明芨芨草植物并没有利用地下水。

自然条件下芨芨草茎水中 δD 组成表现出不同的季节变化特征(图4(a)),芨芨草茎水中 δD 组成在生长初期(6月)与0—20 cm的土壤水中 δD 组成相似,土壤水分利用比例达65.1%(表1)。随着季节的变化,芨芨草对不同深度土壤水分利用比例也存在差异,在7月18日芨芨草对表层0—10cm的土壤水利用比例高达94.2%,且芨芨草茎水中 δD 值与降水中 δD 值比较接近,这表明芨芨草根系利用表层土壤水。在生长季末(8—9月)持续降水影响,表层土壤含水量明显增大,芨芨草根系对浅层土壤水(0—20 cm)利用比例分别为48.7%(8月24日)和36.9%(9月9日)。

在干旱控制条件下芨芨草水分利用能较敏感地响应土壤水分的变化(Table 1),在7月5日芨芨草根系吸水深度主要分布在0—30 cm(77.8%),随着干旱程度的加剧,芨芨草的吸水深度逐渐向深层土壤水转移,在7月8日芨芨草利用表层土壤水,利用比例达67.9%;而在7月18日根系吸水深度在40—60 cm利用比例最高(57.4%)。7月23日和8月1日水源由深层水源(40—60 cm)切换到浅层土壤水(0—20 cm,65.9%),这直接受灌溉水的影响使得表层根系水分利用增加,由此可以看出,芨芨草植物根系吸水功能具有可塑性,其能敏感地响应土壤有效含水量的变化以改变水分利用方式,从而达到避免水分胁迫。

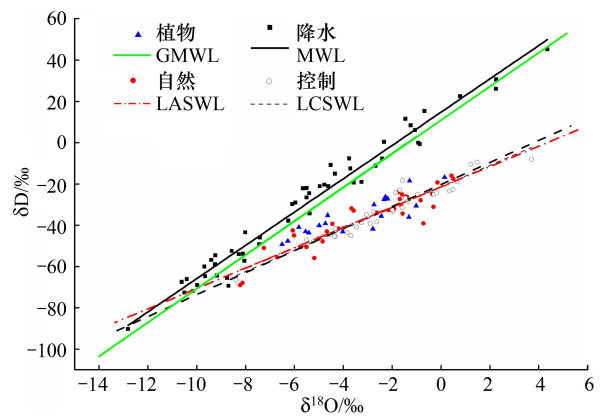
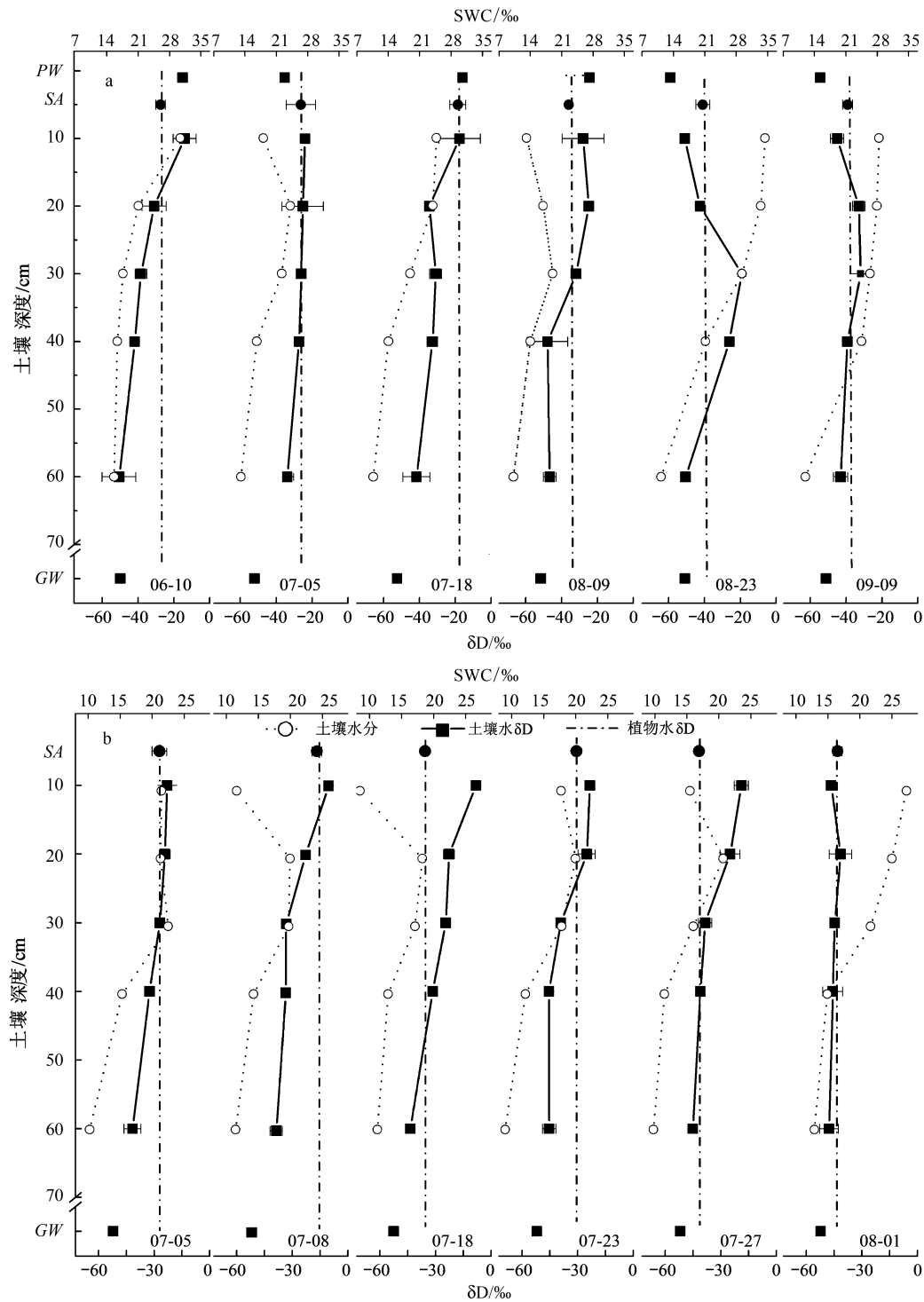


图3 大气降水、土壤水及植物水中 δD - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 3 The regression linear relationships between δD and $\delta^{18}O$ in the precipitation, soil and plant stem water

图 4 土壤水分、土壤水及植物水中 δD 的变化Fig. 4 The variations of soil moisture and δD in soil and plant water

a: 自然条件; b: 干旱处理条件; SA: 芨芨草; PW: 降水

3 讨论

3.1 植物各潜在水源的变化

在干旱半干旱地区植物所利用的潜在水源主要有降水、土壤水、地下水和河水等,其中降水是土壤水和地

下水主要补给水源,因此大气降水中稳定同位素信息能较好地反映土壤水中稳定同位素信息^[27]。青海湖流域大气降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 具有明显季节变化,6—7 月份降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值较高,而在其他月份降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值较低(图 2),这与不同水汽来源密切相关,在 6—7 月降水中稳定同位素偏高,这可能受到两种因素的影响:(1)在此期间降水受到局地蒸发水汽补充,如青海湖大水体,该湖泊水稳定同位素组成较高,如青海湖湖水中的平均 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分别为 10.0‰ 和 1.97‰^[28]。(2)受干热的气象条件的影响使得降落雨滴产生强烈的蒸发作用,此变化特征与全球中高纬度地区降水中稳定同位素变化特征相一致^[29],而在 4—5 月和 8—9 月可能受来自北冰洋高纬度极地气团和季风后期的水汽影响^[30],其稳定同位素含量较低。而 4—6 月固体降水(雪、雨夹雪)中稳定同位素值含量较低,因为固体降水在形成和下降过程中受二次蒸发分馏作用较弱^[21]。

表 1 在不同生境条件下芨芨草对不同深度土壤水的利用比例(平均值/最小值-最大值)

Table 1 The variations of plant-use water proportions from different depths of soil moisture in two habitats for *Achnatherum splendens* (mean (minimum-maximum))

	深度 Depth/cm	6/10	7/5	7/18	8/9	8/23	9/9
自然	10	45.1(21—63)	22.4(0—77)	94.2(93—96)	19.6(0—59)	23.2(0—68)	20.3(0—55)
Control	20	20(0—79)	24.6(0—88)	1.5(0—5)	17.7(0—51)	25.5(0—93)	16.6(0—49)
	30	13.8(0—55)	25.3(0—99)	1.9(0—7)	22.5(0—74)	12.6(0—31)	15.5(0—45)
	40	12.1(0—47)	20.3(0—68)	1.5(0—6)	19.7(0—48)	15.4(0—40)	25.2(0—97)
	60	9.1(0—36)	7.4(0—23)	0.8(0—4)	20.5(0—51)	23.4(0—69)	22.4(0—65)
		7/5	7/8	7/18	7/23	7/27	8/1
控制	10	25.8(0—78)	67.9(49—77)	5.5(0—22)	33.3(0—67)	3(0—12)	8.1(0—33)
Treatment	20	26.4(0—83)	13(0—51)	9.6(0—38)	32.6(0—73)	4(0—16)	62.2(47—73)
	30	25.6(0—98)	6.8(0—27)	10.5(0—42)	13.9(0—45)	12.9(0—50)	13.2(0—53)
	40	14.5(0—43)	6.8(0—26)	17(0—66)	10.1(0—32)	21.7(0—82)	9.9(0—40)
	60	7.7(0—22)	5.5(0—22)	57.4(34—77)	10.1(0—32)	58.4(18—87)	6.6(0—27)

土壤水中 δD 组成主要受降水、蒸发、地下水等因素影响,在不同生境条件、时间、土层深度下土壤水中 δD 组成具有较大的差异性^[25,31]。表层土壤水分和土壤水 δD 组成能敏感地响应降水的变化,如在自然和干旱控制条件下表层土壤水含量和土壤水 δD 组成具有较大的差异性,7 月份降水大部分以小降水事件为主且蒸发作用强烈,土壤水分低, δD 发生强烈富集作用,另外小降水事件受到二次蒸发作用影响使得其 δD 值偏大,因此表层土壤水中稳定同位素值大,深层土壤水中 δD 值明显小于表层的;而在 8—9 月受强降水的影响,表层土壤含水量高且 δD 值较低,这一研究结果与周海等^[18]、田立德等^[27]及 Saxena^[32]研究结果一致,研究发现表层土壤水中稳定同位素组成直接受大气降水的影响,且其与降水中稳定同位素组成有相似的变化趋势,而深层土壤水受降水和蒸发作用影响小,土壤水的入渗深度与降水强度、历时及土壤质地、植物根系特征有关,如在 8 月 23 日前期降水量大($t=5$ d, $P=86.3$ mm)和 9 月 9 日前降水持续时间长($t=11$ d, $P=30.7$ mm)(图 2b),这有利于降水在土壤层中入渗,进而影响着深层土壤水中 δD 值和土壤含水量。另外,土壤水稳定同位素受蒸发分馏作用的影响,随着土壤深度增加蒸发分馏作用逐渐减弱^[23],因此土壤水中 δD 表征出随着土壤深度增加而不断减小(图 4),这表明了在不同的生境条件下降水和蒸发作用对土壤水中稳定同位素的影响。在两种实验条件下深层地下水和土壤水(60 cm)的稳定同位素组成的差异性不显著,地下水中 δD 的波动范围小,这说明地下水受当年降水影响较小。但 8 月 23 日深层(60 cm)土壤水中 δD 值较小,这除了与降水特性有关,还可能与芨芨草根系分布特征密切相关,使得降水快速通过优势流达到此土壤层^[33]。

3.2 两种生境条件下芨芨草水分利用来源的比较分析

两种不同生境下芨芨草具有相同的水分利用方式,均主要依靠不同深度的土壤水,但它们对水分条件变化响应程度具有显著差异(图 4,表 1),这与可能芨芨草的根系分布特征及生理特征有关^[11]。芨芨草为深根性系禾本科草本植物,吸收根范围主要分布在 0—60 cm,根系集中分布于表层土壤,分布在表层土壤中的根

能吸收降水补给土壤水,而深层根系主要利用冬春季降水或者地下水补给的土壤水^[34]。在自然条件下芨芨草根系所吸收水分主要来自表层土壤水(0—30 cm),7月18日表层土壤含水量增加使得芨芨草根系吸水深度转变为浅层,进而随着土壤表层土壤水分的降低,其根系吸水深度逐渐转向较深层土壤水(图4),但这种水分利用方式在干旱控制条件下的芨芨草更显著(图4(b)),土壤水分的变化会引起不同深度根系的活性发生变化,干旱控制条件下芨芨草灌溉后,表层根系的活性增强使得芨芨草表层根系吸收水分增加^[35],从而表明芨芨草对干旱环境具有极强的适应能力。可以看出,芨芨草根系对有效土壤水分具有较强的可塑性,说明其根系吸水特征与干旱半干旱区植物(灌木、乔木)的二形态根系功能类似,在湿季侧根利用浅层土壤水而干季主根吸收深层土壤水或地下水,这有利于植物避免受水分胁迫干扰^[7,36]。在干旱稀树草原地区树木与草本的植物群落主要通过根系的可塑性来吸收可利用的水分,这有利于植物在水分短缺的条件下共生生长^[11]。深根芨芨草植物也能敏感地响应水分条件变化来改变其水分利用方式以更好地适应多变的环境,Asbjornsen *et al* (2008)在爱荷华中部地区研究发现须芒草(*A. gerardii*)系深根植物同样在干湿季节通过根系的可塑性功能来改变根系吸水深度,这使得深根植物在干旱环境下能高效率地利用有效水分和养分供其生长,从而其比浅根伴生植物具有较强的水分和养分竞争优势^[9]。同样,芨芨草根系发达且集中分布于表层土壤,这有利于其高效率地利用不稳定的水分,这可能是芨芨草成为环青海湖生态系统优势植物之一。

地下水往往是干旱半干旱区植物生长的稳定水源,这为旱季植物能有效地避免因干旱胁迫而影响其正常生长^[37],如在西澳大利亚的原生树种(*Banksia prionotes*)、青海湖流域河岸植物具鳞水柏枝(*Myricaria squamosa*)及荒漠生态系统中的白刺(*Nitraria tangutorum*)均在旱季以地下水作为主要的可利用水源^[18,30,36-37]。而芨芨草植物无论在干季还是湿季均不以地下水作为水源(图4),这与芨芨草作为当地牧民寻找地下水水源的指示植物不一致,芨芨草主要生长在地下水位较浅的河岸冲积平原,土壤层较薄,在60cm以下多以碎石和砾石分布为主,这可能在一定程度上隔断了以毛管上升水形式向上运动供植物利用,这可能影响分析了芨芨草根系吸收水分的范围。鉴于此,需下一步人工向深层土壤中注入重氧或氧同位素来示踪芨芨草根系是否利用地下水。

4 结论

基于氢氧稳定同位素技术分析了青海湖流域典型芨芨草生态系统中优势植物芨芨草在不同生境条件下的水分利用来源变化特征,揭示了芨芨草植物的水分利用方式对水分条件响应关系。研究结果表明:

(1)土壤含水量及其稳定同位素组成具有明显的季节变化特征,在两种生境条件下,表层土壤含水量和稳定同位素组成波动范围比深层土壤显著,表明表层土壤受蒸发作用和降水的影响比深层土壤大;

(2)土壤水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值明显偏离青海湖流域大气水线,表明了其经历了蒸发分馏作用,芨芨草植物水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值都集中沿着土壤水蒸发线附近分布,这表征了芨芨草根系吸水主要依靠不同深度的土壤水;

(3)利用同位素多源混合模型(IsoSource)计算自然和干旱控制实验条件下芨芨草根系对土壤水分的利用情况,表明在生长季初期(6月)自然条件下芨芨草根系主要利用表层土壤水(0—10 cm,45.1%),8—9月份由于受降水影响,土壤水分及其同位素组成差异性较小且根系对土壤水分吸收的比例相差不大,表明在土壤含水量较高时不同深度的根系均能吸水一定量的土壤水。而干旱控制实验条件下芨芨草根系吸水深度随着土壤水分的变化而发生转变,这表明芨芨草根系吸水功能与其他灌木相似具有较强的可塑性,这有利于其避免水分胁迫。

参考文献(References):

- [1] 吴珍兰, 卢生莲. 论世界芨芨草属(禾本科)的地理分布. 植物分类学报, 1995, 34(2): 152-161.
- [2] 陈桂琛, 彭敏. 青海省芨芨草原的群落特征及其分布规律. 西北植物学报, 1993, 13(2): 154-162.
- [3] Huai H Y, Wei W H, Zhang Y L. Characteristics of the *Achnatherum splendens* community along the Qinghai-Tibet Railway, China. *Frontiers of Biology in China*, 2008, 3(4): 477-483.

- [4] 周国英, 陈桂琛, 赵以莲, 王顺忠, 李伟, 孙菁, 彭敏. 青海湖地区芨芨草群落特征及其物种多样性研究. 西北植物学报, 2003, 23(11): 1956-1962.
- [5] 周国英, 陈桂琛, 魏国良, 韩友吉, 祝存冠. 青海湖地区芨芨草群落主要种群分布格局研究. 西北植物学报, 2006, 26(3): 579-584.
- [6] 周国英, 陈桂琛, 徐文华, 杨路存, 韩友吉, 李锦萍. 围栏封育对青海湖地区芨芨草草原生物量的影响. 干旱区地理, 2010, 33(3): 434-441.
- [7] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [8] Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment. Journal of Hydrology, 1995, 167(1/4): 351-368.
- [9] Asbjornsen H, Shepherd G, Helmers M, Mora G. 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, 2008, 308(1/2): 69-92.
- [10] Li S G, Tsujimura M, Sugimoto A, Sasaki L, Yamanaka T, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M. Seasonal variation in oxygen isotope composition of waters for a montane larch forest in Mongolia. Trees, 2006, 20(1): 122-130.
- [11] Ward D, Wiegand K, Getzin S. Walter's two-layer hypothesis revisited: back to the roots! Oecologia, 2013, 172(3): 617-630.
- [12] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. Journal of Hydrology, 2007, 342(3/4): 238-248.
- [13] Le Roux X, Bariac T, Mariotti A. Spatial partitioning of the soil water resource between grass and shrub components in a West African humid savanna. Oecologia, 1995, 104(2): 147-155.
- [14] Liu W J, Wang P Y, Li J T, Liu W Y, Li H M. Plasticity of source-water acquisition in epiphytic, transitional and terrestrial growth phases of *Ficus tinctoria*. Ecohydrology, 2014, doi: 10.1002/eco.1475.
- [15] 王珺, 刘茂松, 盛晟, 徐驰, 刘小恺, 王汉杰. 干旱区植物群落土壤水盐及根系生物量的空间分布格局. 生态学报, 2008, 28(9): 4120-4127.
- [16] 朱宝文, 陈晓光, 郑有飞, 李英年. 青海湖北岸天然草地小尺度地表径流与降水关系. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1074-1079.
- [17] 王鹏, 宋献方, 袁瑞强, 韩冬梅, 张应华, 张兵. 基于氢氧稳定同位素的华北农田夏玉米耗水规律研究. 自然资源学报, 2013, 28(3): 481-491.
- [18] 周海, 郑新军, 唐立松, 李彦. 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, 2013, 37(7): 665-673.
- [19] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [20] Peng H, Mayer B, Harris S, Roy K H. A 10-yr record of stable isotope ratios of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada. Tellus B, 2004, 56(2): 147-159.
- [21] Wu H W, Zhang X P, Li X Y, Li G, Huang Y M. Seasonal variations of deuterium and oxygen-18 isotopes and their response to moisture source for precipitation events in the subtropical monsoon region. Hydrological Processes, 2015, 29(1): 90-102.
- [22] Craig H. Isotope variations in meteoric waters. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [23] Barnes C J, Allison G B. Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. Journal of Hydrology, 1988, 100(1/3): 143-176.
- [24] Gibson J J, Edwards T W D. Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(2): 10-1-10-14, doi: 10.1029/2001GB001839.
- [25] Midwood A J, Boutton T W, Archer S R, Watts S E. Water use by woody plants on contrasting soils in a savanna parkland: assessment with $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$. Plant and Soil, 1998, 205(1): 13-24.
- [26] 王军, 傅伯杰, 蒋小平. 土壤水分异质性的研究综述. 水土保持研究, 2002, 9(1): 1-5.
- [27] 田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 孙维贞. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化. 土壤学报, 2002, 39(3): 289-295.
- [28] Zhang P, Zhang B, Yang W. Environmental evolution of the water body of Qinghai Lake since the postglacial age. Chinese Journal of Geochemistry, 1989, 8(2): 112-125.
- [29] 章新平, 刘晶淼, 孙维贞, 黄一民, 张剑明. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究. 中国科学(D辑), 2006, 36(9): 850-859.
- [30] An Z S, Colman S M, Zhou W, Li X Q, Brown E T, Jull A J T, Cai Y J, Huang Y S, Lu X F, Chang H, Song Y, Sun Y, Xu H, Liu W, Jin Z, Liu X, Cheng P, Liu Y, Ai L, Li X, Liu X, Yan L, Shi Z, Wang X, Wu F, Qiang X, Dong J, Lu F, Xu X. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka. Scientific Reports, 2012, 2: 619, doi: 10.1038/srep00619.
- [31] Rossatto D R, Silva L D R, Villalobos-Vega R, Sternberg L S 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.

- [32] Saxena R K. Seasonal variations of oxygen-18 in soil moisture and estimation of recharge in esker and moraine formations. *Nordic Hydrology*, 1984, 15(4): 235-242.
- [33] 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.
- [34] Chimner R A, Cooper D J. Using stable oxygen isotopes to quantify the water source used for transpiration by native shrubs in the San Luis Valley, Colorado U. S. A. *Plant and Soil*, 2004, 260(1/2): 225-236.
- [35] Williams D G, Ehleringer J R. Intra-and interspecific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands. *Ecological Monographs*, 2000, 70(4): 517-537.
- [36] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation. *Oecologia*, 1996, 107: 13-20.
- [37] 赵国琴, 李小雁, 吴华武, 张思毅, 李广泳. 青海湖流域具鳞水柏枝植物水分利用氢同位素示踪研究. *植物生态学报*, 2013, 37(12): 1091-1100.