DOI: 10.5846/stxb202102030366
古丽哈娜提·波拉提别克,常顺利,李红梅,巴贺贾依娜尔·铁木尔别克,张毓涛.天山林区 4 种主要灌木夏季水分来源差异.生态学报,2022,42(13):5471-5480.
Gulihanati Bolatibieke, Chang S L, Li H M, Bahejiayinaer Tiemuerbieke, Zhang Y T. Differences in water sources of four main shrubs of Tianshan Mountains in summer. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5471-5480.

天山林区 4 种主要灌木夏季水分来源差异

古丽哈娜提·波拉提别克[1],常顺利[1,*],李红梅[1],巴贺贾依娜尔·铁木尔别克[1],张毓涛[2]

1 新疆大学资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐　830046
2 新疆林科院森林生态研究所,乌鲁木齐　830063

摘要:天山林区群落结构相对简单、木本植物种类较少,但天山林区灌木群落中主要木本植物间的水分竞争模式尚不明确,水分利用动态缺乏定量分析。运用稳定同位素技术,对天山林区灌木群落 4 种主要灌木的茎杆水分及各潜在水源的氢氧稳定同位素组成进行测定,运用 IsoSource 模型定量分析 4 种灌木在夏季对各潜在水源的相对利用比例,探讨天山林区灌木群落主要灌木树种水分来源差异及动态变化。结果发现:7 月,当浅层土壤含水量充足时,密刺蔷薇、黑果枸子和金丝桃叶绣线菊均大幅度吸收利用浅层土壤水,相对利用比例高于 89.3%,异果小檗则相反,即吸收利用各潜在水源(浅层土壤水 30.7%、中层土壤水 29.4%、深层土壤水 25.7%、溪水 14.2%,下同);8 月,当浅层土壤含水量降低时,密刺蔷薇转移至 60—100 cm 深层土壤水和溪水,相对利用比例分别为 64.8%和 27%,黑果枸子和金丝桃叶绣线菊以相似比例吸收利用各潜在水源(33.8%和 36.8%、30.9%和 29.7%、23.5%和 22.3%、11.8%和 11.2%),异果小檗则表现出可能吸收利用 80—100 cm 以下更稳定的深层土壤水;9 月,当浅层土壤含水量升高时,4 种灌木均大量吸收利用浅层土壤水,相对利用比例高于 72.2%。这表明,天山林区灌木群落主要树种可通过可塑性转换水分来源来应对环境水分变异,在时间和空间上有效分割灌丛水源从而减缓对水分资源的竞争压力,从而通过在水分资源利用上的生态位分化促进物种间的共存。

关键词:水分来源;水分竞争;氢稳定同位素;氧稳定同位素;灌木

Differences in water sources of four main shrubs of Tianshan Mountains in summer

Gulihanati Bolatibieke[1], CHANG Shunli [1,*], LI Hongmei[1], Bahejiayinaer Tiemuerbieke[1], ZHANG Yutao[2]

1 *Key Laboratory of Oasis Ecology under the Ministry of Education, College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*
2 *Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi* 830063, *China*

Abstract: The community structure in the Tianshan Mountains is relatively simple and there are a few woody plant species. However, the water competition pattern among the main woody plants in the shrub community of the Tianshan Mountains is not clear due to lack of the quantitative analysis related to water use dynamics of the shrubs. The hydrogen and oxygen stable isotope composition of xylem water of four main shrubs and their potential water sources in the shrub community in the study area were measured in this paper by using stable isotope technology. In order to explore the differences and dynamics in water sources of main shrub species in shrub community of Tianshan Mountains, the IsoSource model was used to analyze

基金项目:新疆维吾尔自治区教育厅人才类项目-天池博士计划(tcbs201918);新疆大学博士启动基金(BS190206);国家自然科学基金项目(U1503187)

收稿日期:2021-02-03;　　**网络出版日期**:2022-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jayna1020@xju.edu.cn

quantitatively the relative contributions of each potential water source used by the four shrubs in summer. The results showed that in July, when 0—20 cm shallow soil water content was sufficient, *Rosa spinosissima*, *Cotoneaster melanocarpus* and *Spiraea hypericifolia* extensively extracted shallow soil water, and the relative utilization ratio was higher than 89.3%. On contrary, *Berberis heteropoda* absorbed water from all the potential water sources (30.7% of shallow soil water, 29.4% of middle soil water, 25.7% of deep soil water, 14.2% of stream water, the same below); In August, when the water content of the shallow soil decreased, the *Rosa spinosissima* converted to 60—100 cm deep soil water and stream water, and the relative utilization ratios were 64.8% and 27%, respectively. *Cotoneaster melanocarpus* and *Spiraea hypericifolia* extracted water from all the potential water sources in similar proportions (33.8% and 36.8%, 30.9% and 29.7%, 23.5% and 22.3%, 11.8% and 11.2%). *Berberis heteropoda* relied mainly on the stable deep soil water below 80—100 cm; In September, when the shallow soil water content increased, all of the four shrubs absorbed large amount of shallow soil water, and the relative utilization ratio was higher than 72.2%. This indicates that the main tree species of the shrub community in the Tianshan Mountains could convert the plasticity of the water sources to deal with the environmental water variation, by dividing the water sources in time and space to reduce the pressure of competition on water resources, which would promote the coexistence of species through niche differentiation in water resource utilization.

Key Words: water sources; water competition; hydrogen stable isotope; oxygen stable isotope; shrub

植物吸收和利用水分的模式一定程度上决定了生态系统对环境水分状况发生改变时的响应结果[1],探讨植物的水分来源对了解群落内不同物种的水分竞争关系具有重要作用[2]。氢氧稳定同位素示踪技术是探究植物水分来源的一种有效和精确的手段[3—5]。

Dawson 等[6]运用氢氧稳定同位素技术研究生长在河岸的几种树种水分来源,发现这些树种主要利用地下水,并不利用河水,这一研究结果使人们对植物水分利用模式有了新的认识。同时,Dawson 等[7]研究发现,有些深根系灌木能够在土壤垂直剖面上进行水分再分配(即水力提升),为相邻的浅根系草本植物提供水分,使人们认识到不同植物稳定共存中存在的另一种可能机制。研究者们运用氢氧稳定同位素技术发现经历过一个特殊的夏季干旱后,只有深根系物种继续吸收利用土壤水,而浅根系的物种则休眠或死亡[8],这表明虽然植物根系可以遍布整个土壤剖面,但这并不意味着所有根系在其存在的土层中都表现出水分吸收能力[9],到目前为止其它方法则难以证实并解决这一问题。Lin 和 Sternberg [10]发现美国红树植物和半红树植物根吸收水分过程中会发生显著的氢同位素分馏现象,此研究结果使得同位素技术更加完善。利用氢氧稳定同位素技术,Filella 和 Peñuelas[11]研究发现不同生活史的植物水分利用模式在时间和空间上存在差异,他们认为这是植物在干旱半干旱环境下实现生态位分化的重要基础,植物群落物种间水分生态位的分化可以有效降低竞争的激烈程度,以此来促进共存[12—13]。

天山林区在水土保持、水文过程等方面发挥着重要的作用[14—15],未来气候变化可能会对该森林生态系统共存植物水分来源和水分利用模式产生深远影响。本文运用稳定同位素技术定量分析和探究天山林区灌木群落 4 种主要灌木夏季水分利用来源与水分利用模式。拟回答以下科学问题:四种灌木夏季水分来源是否存在差异,为针叶林生态系统不同树种共存机制、水分竞争模式和水分生态位研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天山林区以雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)纯林为主,灌木树种主要有黑果栒子(*Cotoneaster melanocarpus*)、异果小檗(*Berberis heteropoda*)、密刺蔷薇(*Rosa spinosissima*)、金丝桃叶绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、忍冬(*Lonicera hispida*)、锦鸡儿(*Caragana leucophloea*)等,林下草本植物主要有羽衣草(*Alchemilla tianschanica*)、老鹳草(*Geranium rotundifolium*)、羊角芹(*Aegopodium podagraria*)等[16—17]。林下土壤均为山地灰褐色森林

土[14,18]。本研究以乌鲁木齐县板房沟林场天山森林生态系统定位研究站(43°24′48"—43°26′18" N,87°27′29"—87°28′48" E)为依托,在天山北坡中段灌木群落内进行调查采样。属温带大陆性气候,年均气温约为 2.0℃,年降水量 400—600 mm,年蒸发量达 980—1150 mm,年总辐射量达 5.85×105 J $cm^{-2}a^{-1}$,历年极端最高温为 30.5℃、最低温为-30.2℃[19],最大积雪深度为 65 cm[20—21],土壤冻结期为 11 月初至次年 4 月底,持续 6 个月[22],冻融时期长达 4—6 个月[23]。

1.2　研究方法

1.2.1　样品采集

植物样品采集:实验于 2019 年 7—9 月开展,在天山林区灌木群落内分别选取异果小檗、密刺蔷薇、金丝桃叶绣线菊、黑果栒子长势良好的 5 株植株,剪取非绿色的栓化小枝,去皮后迅速装入样品瓶中并用 Parafilm 封口膜密封,之后迅速放入随身携带的冰盒中,带回实验室冷冻保存(-20℃到-15℃),用于测定植物茎杆水氢氧稳定同位素组成(δD、$\delta^{18}O$)。

土壤样品采集:在已选定的每株植物的下方用土钻取 0—100 cm 土层的土壤样品。其中,0—20 cm 每隔 10 cm 为一层,20—100 cm 每隔 20 cm 为一层,共 6 层,每层设 5 个重复。将采集的土壤样品分成 2 份,一份迅速装入样品瓶中并用 Parafilm 封口膜密封,然后迅速放入随身携带的冰盒中,带回实验室冷冻保存(-20℃到-15℃),用于测定土壤水氢氧稳定同位素组成(δD、$\delta^{18}O$);另一份土壤样品迅速装入铝盒,同样迅速放入随身携带的冰盒中,带回站上实验室用烘干法测定土壤质量含水量。

降水样采集:降雨样品采取进行在研究期每次降雨后,雨水通过漏斗进入长颈的收集瓶,每次降雨后将采集的降水从收集瓶内取出装入 10 ml 玻璃采样瓶中,迅速用 Parafilm 封口膜密封并冷藏保存(2℃到 5℃),用于测定降水氢氧稳定同位素组成(δD、$\delta^{18}O$)。

溪水样采集:由于采样地点离冰川较近,土壤中可能含有冰川融化水补给而来的地下径流水供植物吸收利用,研究区附近的溪水和地下径流水均来自冰川融化水,其同位素组成可能与冰川融化水同位素组成相似,因此本研究将溪水近似的代替为地下径流水进行采集。在研究区附近溪水中取出适量水样装入采样瓶中,迅速用 Parafilm 封口膜密封放入冰盒,带回实验室冷藏保存(2℃到 5℃),用于测定溪水氢氧稳定同位素组成(δD、$\delta^{18}O$)。

气象数据的获取:从采样地点附近的梯度通量塔上获取研究区 2019 年 7—9 月气温数据。

1.2.2　样品同位素组成分析

植物和土壤水分的抽提及不同水体的 δD、$\delta^{18}O$ 值测定均在中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室内完成。用低温真空蒸馏法提取植物及土壤水分。用基于稳定同位素红外光谱技术的液态水同位素分析仪(LWIA,DLT-100,Los Gatos Research,Mountain View,CA,USA)测定各水体氢氧稳定同位素组成(δD、$\delta^{18}O$)。其计算公式如下:

$$\delta X = \left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1\right) \times 1000‰$$

式中,X 代表需要测定的氢氧同位素组成;R_{sample}代表样品中氢氧元素的重轻同位素丰度之比;$R_{standard}$代表国际通用标准物 VSMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water)中氢氧元素的重轻同位素丰度之比。

为了消除甲醇和乙醇类有机污染物造成的误差[24],结合 Los Gatos 公司的光谱分析软件确定甲醇和乙醇类物质污染程度的光谱度量组成,用 Wu 等[25]创建的标准曲线对植物茎杆水 δD、$\delta^{18}O$ 值进行校正。

运用 IsoSource 模型计算分析各潜在水源对 4 种灌木的相对贡献比例及范围。模型的来源增量(Source increment)设为 2%,质量平衡公差(Mass balance tolerance)设为 0.01。考虑到氢同位素较氧同位素容易受外界因素影响[10, 26—27],本研究选择氧同位素来确定植物的水源。为了方便对比与分析,依据每一土层土壤水 δD、$\delta^{18}O$ 值的相似性,将土体划分为 3 个水源:浅层土壤水(0—20 cm)、中层土壤水(20—60 cm)和深层土壤水(60—100 cm),加之溪水共划分 4 个潜在水源。

1.2.3 土壤水 lc-excess * 的计算

为确定研究区土壤水和溪水同位素组成的蒸发分馏程度,根据 Landwehr 和 Coplen[28] 的线性条件剩余盈余(Line-conditioned lc-excess)公式计算出研究区土壤水和溪水线性条件剩余,公式如下:

$$\text{lc-excess}^{*} = \frac{[\delta^{2}\text{H} - a\delta^{18}\text{O} - b]}{S}$$

$$S = [(\delta\text{Danalyticalerror})^{2} + (\delta^{18}\text{Oanalyticalerror})^{2}]^{0.5}$$

式中,a 和 b 分别为当地降水线(LMWL)的斜率和截距,S 是 δD 和 δ^{18}O 的一个标准偏差测量不确定度,其中 δD 和 δ^{18}O 的分析误差分别为±0.6‰和±0.2‰。lc-excess * 是当地降水线(LMWL)的偏差,负的 lc-excess * 值表明水体在水文过程中发生蒸发分馏[28—29]。

1.2.4 数据分析

运用 IBM SPSS 19.0 进行数据统计分析。土壤含水量和土壤水氢氧稳定同位素组成等变量的土层差异和月份差异使用一般线性模型(GML)单变量分析,多重检验使用 Tukey 的显著性差异(HSD)分析。回归和相关性分析使用 Pearson 的相关系数。运用 Origin8.5(Origin Lab Corp.,Northampton,MA,USA)进行绘图,显著性检验水平均为 0.05。

2 结果与分析

2.1 研究区降水同位素组成变化及其温度效应

2019 年 7—9 月大气温度及降水 δD、δ^{18}O 值随时间的变化如图 1 所示。大气温度在 7 月和 8 月较高,分别为 19.14℃和 14.94℃,9 月相对较低为 8.79℃。7—9 月,分别采集到降雨 7 次、5 次和 7 次。7—9 月降水 δD、δ^{18}O 值变化范围分别为-98.7‰—3.8‰和-15.3‰—0.6‰,7 月和 8 月降水 δD、δ^{18}O 值较富集,9 月贫化。结果显示,降水 δD 值变化和 δ^{18}O 值变化与大气温度变化呈显著的正相关关系(图 2),表明降水 δD、δ^{18}O 值具有显著的温度效应。

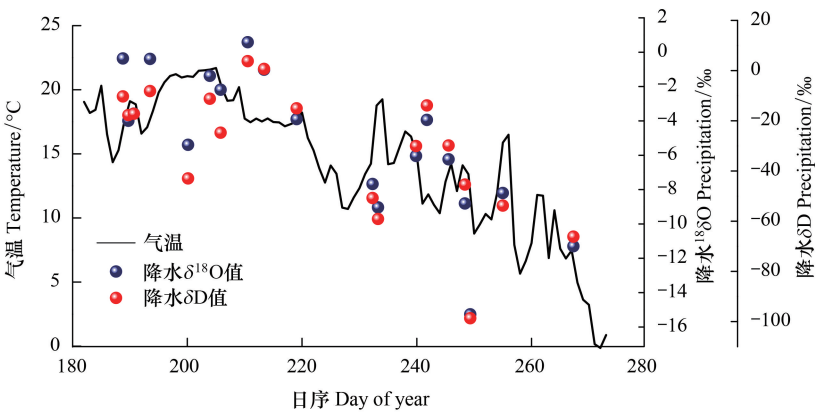

图 1 研究区 2019 年 7—9 月气温以及降水 δD、δ^{18}O 值变化

Fig.1 Daily temperature and δD and δ^{18}O of precipitation from July to September in study area

2.2 当地降水线和土壤蒸发线变化特征

当地降水线(LMWL:δD = 6.1δ^{18}O+0.3,R^2 = 0.92,n = 19,P<0.01)的斜率与全球降水线(GMWL:δD = 8δ^{18}O+10)[30] 的斜率相比,当地降水线的斜率较低于全球降水线斜率(图 3)。土壤蒸发线(EWL:δD = 5.4δ^{18}O−21.7,R^2 = 0.95,P<0.01)偏离全球降水线和当地降水线(图 3)。植物茎杆水 δD、δ^{18}O 值基本落在土壤蒸发线上(图 3)。

2.3　土壤质量含水量动态变化

7—9 月,土壤含水量变化趋势相似,但月份间差异显著。7—9 月,0—10 cm 的土壤含水量极显著高于 20—100 cm 土壤含水量($P<0.001$),3 个月 20—100 cm 内不同土壤层土壤含水量之间均不存在显著差异($P>>0.05$)。3 个月之间相较,8 月 0—10 cm 层土壤含水量显著低于 7 月和 9 月 0—10 cm 层土壤含水量($P<0.01$)。8 月和 9 月 20—100 cm 土壤含水量极显著低于 7 月 20—100 cm 土壤含水量($P<0.001$)(图 4 和表 1)。

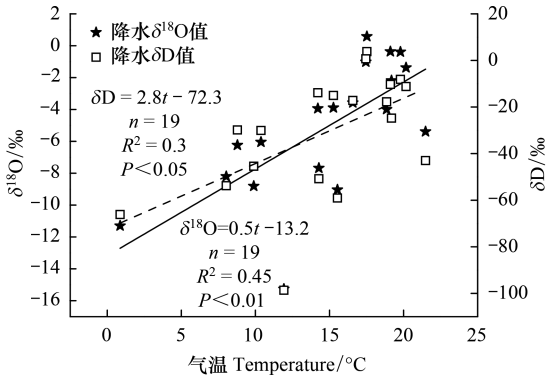

图 2　降水 δD、δ18O 值与气温之间的相关关系

Fig.2　Relationships between the δD and δ18O of precipitation and temperature

2.4　灌木茎杆水和土壤水氢氧同位素组成变化特征

研究区 7—9 月土壤水 $\delta^{18}O$ 值总体变化范围在 −12.16‰—−5.72‰,δD 值变化范围在 −87.38‰—−54.35‰。3 个月 0—20 cm 浅层土壤水 δD、$\delta^{18}O$ 值不同程度富集,20—100 cm 内土壤水 δD、$\delta^{18}O$ 值基本不随土壤深度变化而变化。3 个月间相较,0—100 cm 内的各土层土壤水 δD、$\delta^{18}O$ 值之间的月份差异未达到显著水平($P>>0.05$),(图 5 和表 1)。7—9 月,4 种灌木茎杆水 $\delta^{18}O$ 值总体变化范围在−13.30‰—−7.09‰,δD 值变化范围在−102.31‰—−60.58‰,植物茎杆水 δD、$\delta^{18}O$ 值分布在土壤水 δD、$\delta^{18}O$ 值分布区间,表明植物水源主要来源于土壤水[31]。7 月异果小檗茎杆水 δD、$\delta^{18}O$ 值显著($P<0.05$)偏负于其他 3 种灌木茎杆水 δD、$\delta^{18}O$ 值。总体而言,4 种灌木 8 月茎杆水 δD、$\delta^{18}O$ 值相对于 7 月和 9 月偏负(图 5)。

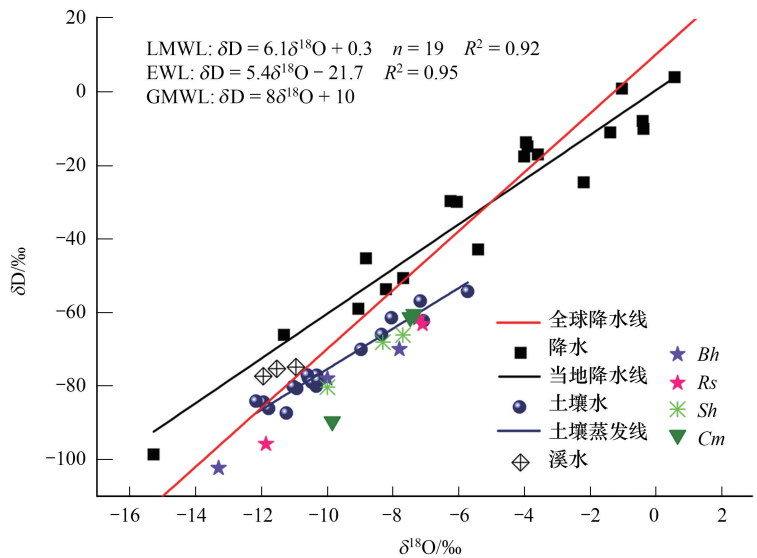

图 3　降水、土壤水和茎杆水 δD、δ18O 值之间的关系

Fig.3　Relationships between the δD and δ18O of precipitation、soil water and xylem water

GMWL:全球降水线 Global meteoric water line; LMWL:当地降水线 Local meteoric water line; EWL:土壤蒸发线 Soil evaporation line; *Bh*:异果小檗 *Berberis heteropoda*; *Rs*:密刺蔷薇 *Rosa spinosissima*; *Sh*:金丝桃叶绣线菊 *Spiraea hypericifolia*; *Cm*:黑果栒子 *Cotoneaster melanocarpus*

2.5　土壤水 lc-excess* 月份变化

土壤水 lc-excess* 值变化范围在−31.22‰—−16.27‰(图 6)。9 月 40—60 cm 和 80—100 cm 土壤水 lc-excess* 值较 7 月和 8 月 40—60 cm 和 80—100 cm 土壤水 lc-excess* 值显著偏负(40—60 cm:$P<0.01$,80—100 cm:$P<0.01$ 和 $P<0.001$),7 月和 8 月 20—100 cm 土壤水 lc-excess* 值间月份差异不显著($P>>0.05$)。总体

上,9 月 20—100 cm 土壤水 lc-excess* 值较 7 月和 8 月 20—100 cm 土壤水 lc-excess* 值偏负(图 6)。研究区溪水 7—9 月 lc-excess* 值相对于土壤水 lc-excess* 值偏正,变化范围在-13.37‰—-7.63‰,表明研究区溪水受蒸发作用的影响较小。

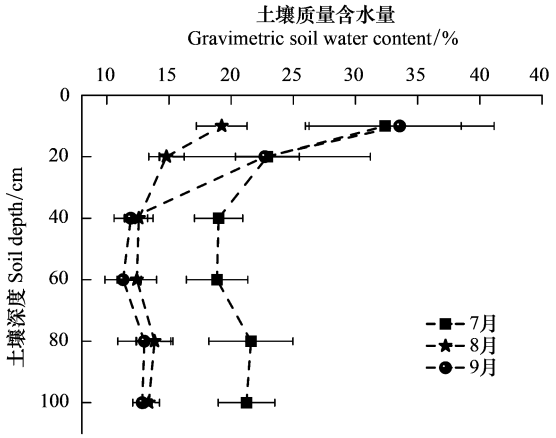

图 4 研究区不同深度土层土壤质量含水量的变化(平均值±标准差,$n=5$)

Fig.4 Vertical profiles of gravimetric soil water content in study area(Mean±SD, $n=5$)

2.6 不同灌木对各潜在水源的相对利用比例

IsoSource 模型计算结果显示,7—9 月,4 种灌木水分来源存在种间和月份差异(图 7)。7 月,0—20 cm 浅层土壤水对密刺蔷薇、黑果栒子和金丝桃叶绣线菊的相对贡献比例分别高达 99%、93.8%和 89.3%。异果小檗则相反,它同时吸收利用各潜在水源,浅层土壤水(0—20 cm)、中层土壤水(20—60 cm)、深层土壤水(60—100 cm)和溪水对它的相对贡献比例分别为 30.7%、29.4%、25.7%和 14.2%(图 7)。8 月,深层土壤水(60—100 cm)对密刺蔷薇的相对贡献比例达到 64.8%,其次为溪水,相对贡献比例为 27%。金丝桃叶绣线菊和黑果栒子以相似比例同时吸收利用各潜在水源,浅层土壤水(0—20 cm)、中层土壤水(20—60 cm)、深层土壤水(60—100 cm)和溪水对它们的相对贡献比例分别为 33.8%和 36.8%、30.9%和 29.7%、23.5%和 22.3%、11.8%和 11.2%(图 7)。异果小檗 8 月水分来源 IsoSource 模型无法计算出结果。9 月,0—20 cm 浅层土壤水对 4 种灌木的相对贡献比例分别高达 100%(密刺蔷薇)、93.8%(黑果栒子)、83.9%(异果小檗)、72.2%(金丝桃叶绣

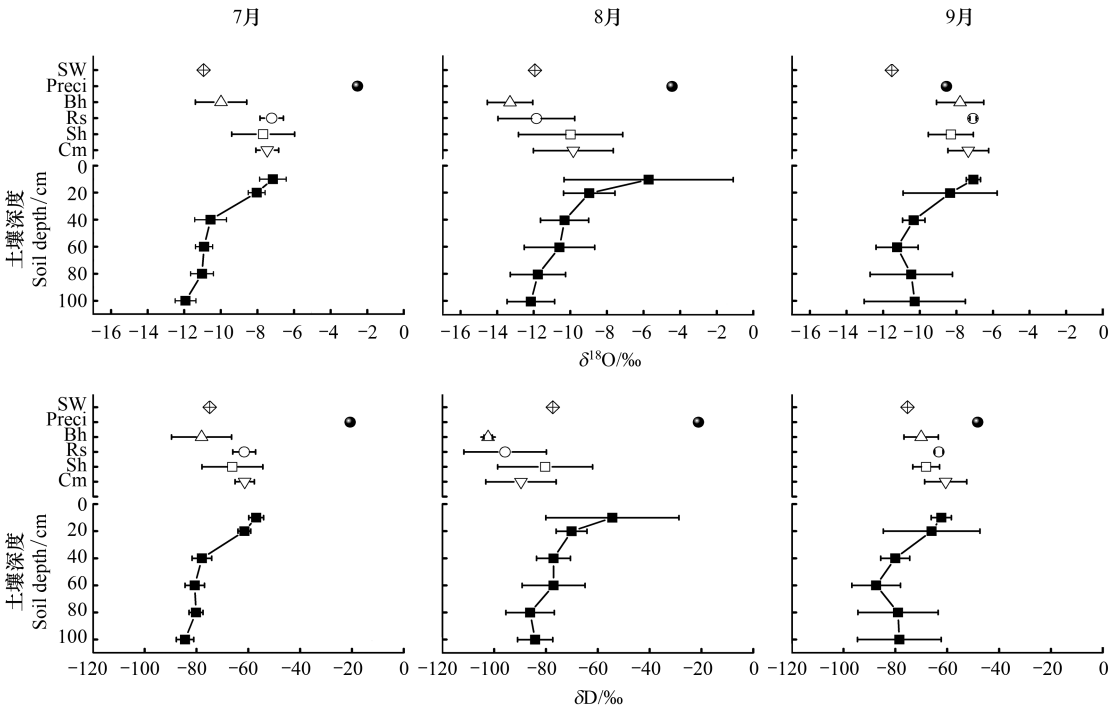

图 5 不同灌木茎杆水和土壤水 δD、δ18O 值变化特征(平均值±标准差,$n=5$)

Fig.5 Change characteristics of δD and δ18O of different shrub xylem water and soil water(Mean ± SD, $n=5$)

SW:溪水 stream water; Preci:降水 precipitation; Bh:异果小檗 *Berberis heteropoda*; Rs:密刺蔷薇 *Rosa spinosissima*; Sh:金丝桃叶绣线菊 *Spiraea hypericifolia*; Cm:黑果栒子 *Cotoneaster melanocarpus*

线菊)(图 7)。

表 1　7—9 月土壤质量含水量和土壤水 δD、δ^{18}O 值土壤深度差异和月份差异的 GML 单因素方差分析结果

Table 1　Results of the GLM single factor analysis on soil depth and month differences of gravimetric soil water content and δD and δ^{18}O of soil water from July to September

土壤含水量 Gravimetric soil water content	土壤水 δD 和 δ^{18}O δD and δ^{18}O of soil water								
	7—9 月 From July to September			7—9 月 From July to September					
				δD			δ^{18}O		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
土壤深度 Soil depth	5	35.49	<0.001	5	13.94	<0.001	5	15.86	<0.001
月份 Month	2	43.61	<0.001	2	0.25	0.78	2	0.18	0.84
土壤深度×月份 Soil depth×Month	10	4.56	<0.001	10	0.74	0.68	10	0.82	0.61

3　讨论

3.1　土壤含水量和各潜在水源同位素组成变化规律

由于受温度效应的影响(图 2),降水 δD、δ^{18}O 值在 7 月和 8 月较为富集,9 月贫化(图 1)。当地降水线(LMWL)斜率较低于全球降水线(GMWL)[30]斜率(图 3),表明夏季降水受蒸发影响较显著,这是由于天山北坡受中纬度西风带的控制,来自大西洋和北冰洋的湿润气流从西方或者西北方向吹入,受天山阻挡[32],空气较干燥,在降水过程中发生不平衡的二次蒸发[33]。土壤蒸发线(EWL)落在全球降水线右下方(图 3),即相对于当地降水,土壤水受蒸发分馏的影响较明显,但与其他干旱荒漠生态系统土壤蒸发线斜率相比[34],其斜率更平缓一些(图 3),说明研究区土壤水受蒸发影响相对较小。

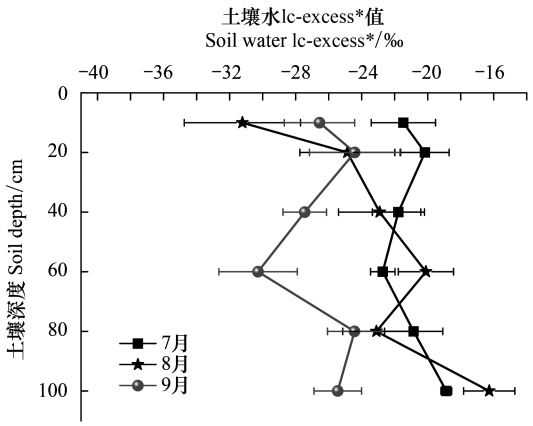

图 6　土壤水 lc-excess * 值月份变化(平均值±标准差,$n=5$)

Fig.6　Variations in lc-excess * values of soil water from July to September (Mean ± SD, $n=5$)

本研究中,由于 7 月和 9 月降雨次数相对较多(图 1),这段时期 0—10 cm 层土壤含水量显著($P<0.01$)高于 8 月 0—10 cm 层土壤含水量(图 4),总体上,7 月和 9 月 0—20 cm 浅层土壤含水量明显高于 8 月(图 4)。20—100 cm 内的土壤水分则不易受降水脉冲的影响(图 4)。8 月和 9 月 20—100 cm 土壤含水量极显著($P<0.001$)低于 7 月(图 4 和表 1),根据本研究结果,7 月和 8 月 20—100 cm 土壤水 lc-excess* 值相似(图 6),由此可推测 8 月 20—100 cm 土壤水同位素组成未发生强烈蒸发分馏,受蒸发作用较小。因此,8 月 20—100 cm 土壤含水量减少可能主要与土壤水分快速下渗有关。然而,9 月 20—100 cm 土壤水 lc-excess* 值明显偏离 0‰,且负于 7 月和 8 月 20—100 cm 土壤水 lc-excess* 值(图 6),9 月 20—100 cm 土壤含水量减少在一定程度上与土壤水受蒸发流失有关。再之,9 月土壤水显著降低可能与土壤中水分留存的时间有关。根据前人的报告,研究区冬季经历长达 6 个月的积雪覆盖时期,春季的冻融时期可长达 4 个月[23],由此可见,春夏季研究区土壤含水量受冬季积雪融化水的补给而出现相对较高的值,因而 7 月相对而言土壤含水量较高(图 4)。随后,随着气温的增高,土壤水受蒸发的影响逐渐增大。另一方面,前人研究结果显示,本文中的灌木群落生长的立地具有一定坡度[35],这可能会使土壤水下渗流失更快。因此 9 月 20—100 cm 土壤含水量显著降低是因为土壤水受蒸发和下渗的时间相对较长,但这种推测尚需要进一步研究并证实。

3.2　天山林区主要灌木夏季水分来源差异

7 月和 9 月 4 种灌木均吸收利用 0—20 cm 浅层土壤水,相对利用比例在 30.7%—100%之间(图 7)。这一方面是因为 0—20 cm 浅层土壤含水量充足(图 4)。另一方面可能与土壤养分主要集中在土壤浅层密切相

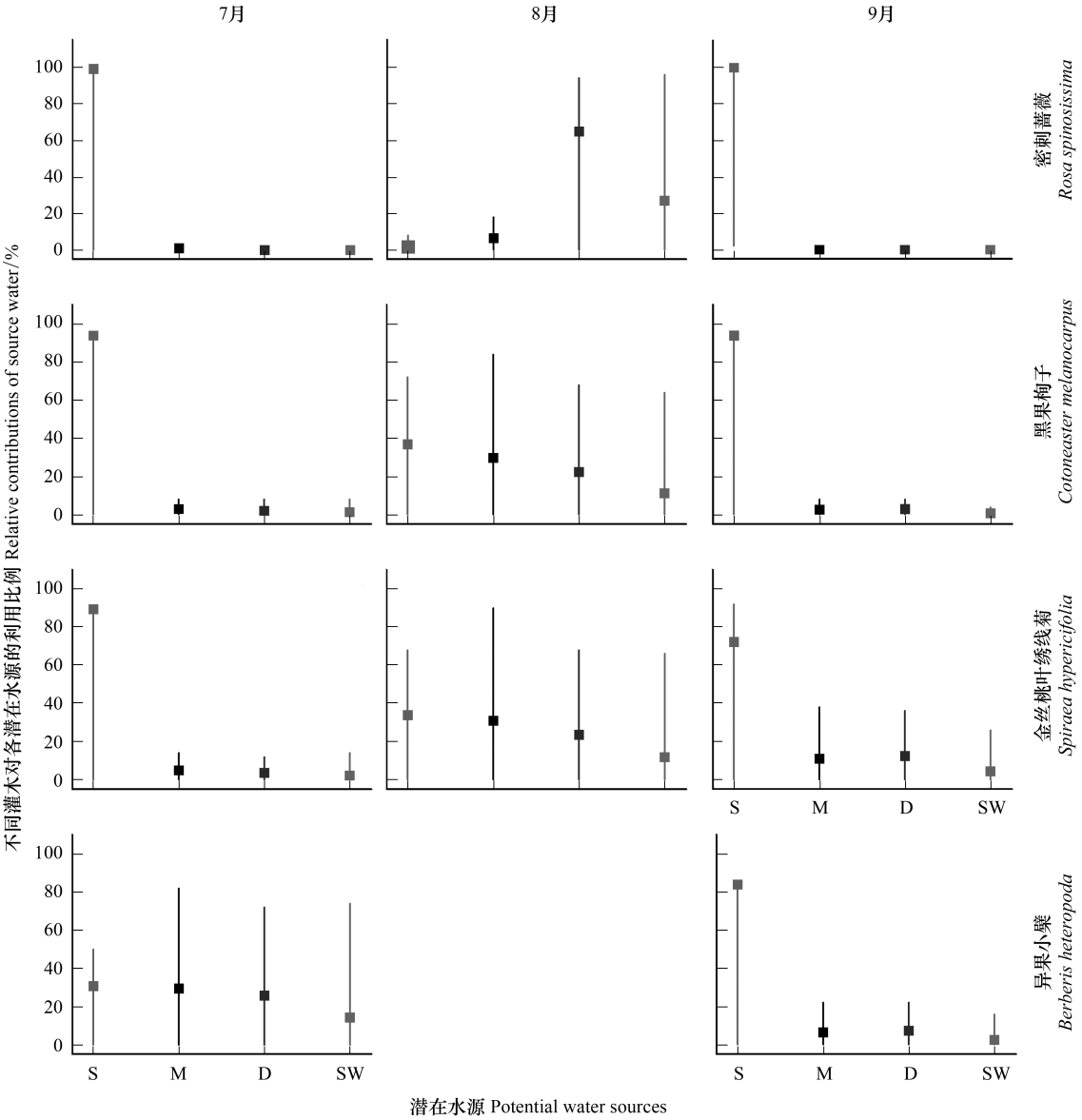

图 7 7—9 月不同灌木对潜在水源的相对利用比例

Fig.7 Relative contributions of each potential water source to the four shrubs from July to September

S:浅层土壤水 shallow soil water; M:中层土壤水 middle soil water; D:深层土壤水 deep soil water; SW:溪水 stream water; 方块表示均值,竖线代表最小值和最大值的范围

关[31]。阿茹·苏里坦等[35]研究结果显示,本文中的灌木群落 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 层的土壤有机质含量分别为 45.73 g/kg、27.27 g/kg 和 26.11 g/kg,这表明土壤养分含量在浅层较高。此外,天山北坡土壤有机质、全氮和全磷含量随采样深度增加而降低,即“表聚现象”明显[32]。因此,这些灌木对浅层土壤水分的充分利用也有利于养分吸收。相比于其他 3 种灌木,异果小檗 7 月对浅层土壤水的利用比例较低(30.7%),它以相似比例同时吸收利用各潜在水源(图 7)。与 7 月相比,9 月异果小檗对浅层土壤水的相对利用比例增至 83.9%。7 月植物生长旺盛期,不同灌木之间水分资源竞争较强烈,在此期间异果小檗通过调整根系功能充分利用各潜在水源[36],对满足其生长旺盛期水分需求量可能更有利[37]。9 月浅层土壤含水量较高,加之在此期间 4 种灌木生长速度减慢,对水分需求量可能会减少,不同灌木间的水分竞争减弱,因而对浅层土壤水之外的水源的相对利用比例降低(图 7)。

8 月,随着 0—20 cm 浅层土壤水分的减少,所有灌木迅速转换水分利用方式(图 7)。表明这几种灌木能够可塑性转换水分来源以应对土壤水分变异,同时发现 8 月不同灌木水分来源存在种间差异(图 7)。密刺蔷薇转移至 60—100 cm 深层土壤水和溪水(相对利用比例分别为 64.8%和 27%)。金色桃叶绣线菊和黑果栒子同时吸收利用各潜在水源(相对吸收比例分别为浅层土壤水 33.8%和 36.8%、中层土壤水 30.9%和 29.7%、深层土壤水 23.5%和 22.3%、溪水 11.8%和 11.2%)。根据 IsoSource 模型计算结果得出,异果小檗吸水层不在 0—100 cm 范围内。其茎杆水 $\delta^{18}O$ 值(-13.30‰±1.24‰)相比其他 3 种灌木更偏负(图 5)。根据研究区土壤水 $\delta^{18}O$ 值随着土壤深度加深越来越贫化的趋势(图 5),可推测异果小檗可能吸收利用 80—100 cm 以下更稳定的深层土壤水。以上研究结果表明,8 月土壤含水量低(图 4),4 种灌木对水源的竞争压力较高,因此利用不同的水源能够使它们减缓对有限水分资源的竞争压力。以往的研究显示,不同植物根系在土壤垂直剖面分布差异有利于共存植物在时空尺度上分割其水源,使得有限资源充分利用,从而促进植物共存[38—39]。4 种灌木对水源利用的时间和空间差异,可被认为是一种物种间的水分生态位分化。相关研究显示,这些灌木水分生态位分化可通过生物量分配差异以及根系生物量在径级上的分配差异来实现[40]。不同灌木间水分生态位分化这一特征对于降低水分竞争的激烈程度、实现同一生境下共存起到了积极作用[12,37]。另一方面,有关植物水分来源研究显示,有些旱生灌木具有二态性根系(Dimorphic root system)[41],如古尔班通古特沙漠南缘梭梭、白梭梭和多枝柽柳等荒漠灌木,当土壤浅层水分充足时吸收利用浅层土壤水,随着土壤浅层水分含量的降低,转换利用更深层的水源[34,42]。根据本研究中 4 种灌木 3 个月的水分利用动态表现出以上研究中出现的植物水分利用特征,本文推测温带针叶林灌木树种也可能存在二态性根系,使它们能够在不同时期迅速替换水源来应对环境水分变异。这种柔性水分利用策略有利于植物应对天山林区未来气候变化造成的降雨格局的变化,增强植物的适应能力。对于荒漠灌木而言,来自较稳定的深层土壤水或地下水和降水脉冲的浅层土壤水是主要水分来源,因而产生二态性根系对于其生存至关重要。然而温带针叶林而言,植物产生二态性根系也可能具有一定的积极作用。天山雪岭云杉针叶林生态系统因地质结构特征,其土壤厚度较薄,使得植物水分吸收深度受一定程度上的限制。因此,这些灌木产生二态性根系能够使其充分利用岩石层以上有限的水分资源,然而这种推测尚有进一步的验证与讨论的空间。此外,本研究中异果小檗和其他 3 种灌木分别在 7 月和 8 月对溪水存在一定比例吸收(图 7),根据上文中提及,本文认为由冰川融化水补给的土壤水可能是这些灌木应对水分胁迫和竞争压力时的重要水分来源之一。

4　结论

综合而言,研究区降水氢氧同位素组成温度效应显著。研究区由降水脉冲补给的浅层土壤水动态变化间接影响了天山林区灌木群落 4 种主要灌木夏季水分利用动态。当浅层土壤含水量较高时,大部分灌木主要依赖浅层土壤水,也有灌木同时吸收利用各潜在水源。当浅层土壤含水量降低时,所有灌木则转换利用深层土壤水或者各潜在水源。4 种灌木水分利用模式反映了它们能够可塑性转换水分来源来应对环境水分变异,在时间和空间上利用不同的水源来减缓水分竞争压力,从而通过在水分资源利用上的生态位分化促进物种间的共存。除此之外,研究区由冰川融化水补给的土壤水也是该生态系统重要的植物水分来源之一。

参考文献(References):

[1] Ewe S M L, Da Silveira Lobo Sternberg L, Busch D E. Water-use patterns of woody species in pineland and hammock communities of South Florida. Forest Ecology and Management, 1999, 118(1/3): 139-148.
[2] 丁丹, 贾文雄, 马兴刚, 王洁. 祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源. 生态学报, 2018, 38(4): 1348-1356.
[3] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(9): 1073-1082.
[4] 林光辉. 稳定同位素生态学: 先进技术推动的生态学新分支. 植物生态学报, 2010, 34(2): 119-122.
[5] 刘飞, 刘攀, 曹铭, 杨冲, 陈婷婷, 周华坤, 王文颖. 稳定同位素技术在植物水分关系研究中的应用综述. 生态科学, 2020, 39(6): 224-232.
[6] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water. Nature, 1991, 350(6316): 335-337.
[7] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. Oecologia, 1993, 95

(4): 565-574.
[8] Schwinning S, Starr B I, Ehleringer J R. Summer and winter drought in a cold desert ecosystem (Colorado Plateau) part I: effects on soil water and plant water uptake. Journal of Arid Environments, 2005, 60(4): 547-566.
[9] 徐庆, 冀春雷, 王海英, 李旸. 氢氧碳稳定同位素在植物水分利用策略研究中的应用. 世界林业研究, 2009, 22(4): 41-46.
[10] Lin G H, da Sternberg L S L. Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants//Ehleringer J R, Hall A E, Farquhar G D, eds. Stable Isotopes and Plant Carbon-water Relations. Amsterdam: Elsevier, 1993: 497-510.
[11] Filella I, Peñuelas J. Partitioning of water and nitrogen in co-occurring Mediterranean woody shrub species of different evolutionary history. Oecologia, 2003, 137(1): 51-61.
[12] Chesson P, Gebauer R L E, Schwinning S, Huntly N, Wiegand K, Ernest M S K, Sher A, Novoplansky A, Weltzin J F. Resource pulses, species interactions, and diversity maintenance in arid and semi-arid environments. Oecologia, 2004, 141(2): 236-253.
[13] Stratton L C, Goldstein G, Meinzer F C. Temporal and spatial partitioning of water resources among eight woody species in a Hawaiian dry forest. Oecologia, 2000, 124(3): 309-317.
[14] 胡仲豪, 常顺利, 张毓涛, 陈磊, 李翔. 天山林区不同类型群落土壤氮素对冻融过程的动态响应. 生态学报, 2019, 39(2): 571-579.
[15] 阿地来·赛提尼亚孜, 常顺利, 张毓涛, 孙雪娇, 李吉玫, 李翔. 天山雪岭云杉林群落组成与结构10年动态变化. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3033-3040.
[16] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 王慧杰, 宋成程, 何平, 孙雪娇. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性. 生态学报, 2016, 36(14): 4363-4372.
[17] 李翾然, 常顺利, 张毓涛. 天山雪岭云杉林粗木质残体储量特征. 生态学报, 2019, 39(10): 3730-3739.
[18] 孙雪娇, 常顺利, 张毓涛, 李吉玫. 天山森林植物功能性状与碳库沿海拔梯度的变化. 生态学报, 2018, 38(14): 4994-5005.
[19] 李海军, 张毓涛, 张新平, 韩占涛, 芦建江, 李翔. 天山中部天然云杉林森林生态系统降水过程中的水质变化. 生态学报, 2010, 30(18): 4828-4838.
[20] 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 仇瑶, 何平. 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素. 生态学报, 2014, 34(7): 1626-1634.
[21] 张毓涛, 梁凤超, 常顺利, 师庆东, 李翔, 芦建江. 基于8hm^{2}样地的天山云杉林蒸腾耗水从单株到林分的转换. 生态学报, 2011, 31(12): 3330-3339.
[22] 陈磊, 常顺利, 张毓涛, 张云云. 天山林区土壤总氮矿化过程对季节性冻融的响应. 生态学报, 2020, 40(12): 3968-3978.
[23] 邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响. 地理学报, 2018, 73(7): 1309-1323.
[24] Schultz N M, Griffis T J, Lee X, Baker J M. Identification and correction of spectral contamination in $^2H/^1H$ and $^{18}O/^{16}O$ measured in leaf, stem, and soil water. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2011, 25(21): 3360-3368.
[25] Wu Y, Zhou H, Zheng X J, Li Y, Tang L S. Seasonal changes in the water use strategies of three co-occurring desert shrubs. Hydrological Processes, 2014, 28(26): 6265-6275.
[26] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. Plant and Soil, 2007, 291(1/2): 93-107.
[27] 王锐, 章新平, 戴军杰, 罗紫东, 贺新光, 关华德. 亚热带地区不同林分下植物水分利用的季节差异. 生态环境学报, 2020, 29(4): 665-675.
[28] Landwehr J M, Coplen T B. Line-conditioned excess: a new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems. International Conference on Isotopes in Environmental Studies, Vienna: IAEA Vienna, 2006.
[29] Sprenger M, Leistert H, Gimbel K, Weiler M. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes. Reviews of Geophysics, 2016, 54(3): 674-704.
[30] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
[31] 吕婷, 赵西宁, 高晓东, 潘燕辉. 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, 2017, 41(2): 175-185.
[32] 陈曦, 许文强, 罗格平, 蔺卿, 肖鲁湘. 天山北坡不同环境条件下雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林限土壤属性. 生态学报, 2008, 28(1): 53-61.
[33] 杨斌. 氢氧稳定同位素在植物水分溯源及蒸散组分区分研究中的应用——以中亚热带人工林和黑河中游绿洲农田为例[D]. 北京: 中国科学院大学(地理科学与资源研究所), 2016.
[34] Tiemuerbieke B, Min X J, Zang Y X, Xing P, Ma J Y, Sun W. Water use patterns of co-occurring C_3 and C_4 shrubs in the Gurbantonggut desert in northwestern China. Science of the Total Environment, 2018, 634: 341-354.
[35] 阿茹·苏里坦, 常顺利, 张毓涛. 天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟. 生态学报, 2019, 39(24): 9111-9118.
[36] Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, Adams H D, Collins A D, Dickman L T, Newman B D, Stockton E A, McDowell N G. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees. New Phytologist, 2017, 213(2): 584-596.
[37] Moreno-Gutiérrez C, Dawson T E, Nicolás E, Querejeta J I. Isotopes reveal contrasting water use strategies among coexisting plant species in a Mediterranean ecosystem. New Phytologist, 2012, 196(2): 489-496.
[38] 巴贺贾依娜尔·铁木尔别克. 古尔班通古特沙漠南缘共存C_3和C_4灌木水分来源与水分利用策略[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院(新疆生态与地理研究所), 2018.
[39] Dodd M B, Lauenroth W K, Welker J M. Differential water resource use by herbaceous and woody plant life-forms in a shortgrass steppe community. Oecologia, 1998, 117(4): 504-512.
[40] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 王文栋, 何平, 王慧杰, 谢锦. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性. 生态学报, 2015, 35(23): 7842-7851.
[41] 吴雪. 古尔班通古特沙漠南部两种梭梭属植物分布及其与地下水埋深关系[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院大学(新疆生态与地理研究所), 2019.
[42] Wu X, Zheng X J, Li Y, Xu G Q. Varying responses of two *Haloxylon* species to extreme drought and groundwater depth. Environmental and Experimental Botany, 2019, 158: 63-72.