

DOI: 10.5846/stxb202202100330

柳利利, 韩磊, 高阳, 彭苓, 王仁, 王娜娜, 周鹏, 展秀丽. 宁夏河东沙区刺槐和丝绵木水分利用策略. 生态学报, 2023, 43(2): 812-825.

Liu L L, Han L, Gao Y, Peng L, Wang R, Wang N N, Zhou P, Zhan X L. Water use strategies of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia, China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 812-825.

宁夏河东沙区刺槐和丝绵木水分利用策略

柳利利^{1,2,3}, 韩磊^{1,2,3,*}, 高阳^{1,2,3}, 彭苓⁴, 王仁⁵, 王娜娜^{1,2,3}, 周鹏⁴, 展秀丽^{1,2,3}

1 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021

2 中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021

3 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021

4 宁夏大学农学院, 银川 750021

5 宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区管理局, 银川 751400

摘要:刺槐和丝绵木混交林是宁夏河东沙区防护林建设的主要模式, 了解刺槐和丝绵木的水分利用策略, 能为区域植被恢复和防护林林分结构调整提供科学依据。以宁夏河东沙区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和丝绵木(*Euonymus bungeanus*)混交林为研究对象, 通过监测微气象、树干液流和土壤质量含水量, 结合大气降水、土壤水、植物木质部水同位素组成, 采用 Granier 及其校正公式, 运用贝叶斯混合模型(MixSIAR)和相似性比例指数(PS)研究 2 个树种的蒸腾耗水、水分来源和水分利用关系。结果表明:刺槐和丝绵木的蒸腾耗水量在生长季中期较高, 前期和后期较小, 刺槐的蒸腾耗水量是丝绵木的 1.55 倍;影响刺槐蒸腾耗水的主要环境因子为饱和水汽压差、太阳辐射、0—40 cm 土壤质量含水量和 40—120 cm 土壤质量含水量;影响丝绵木蒸腾耗水的主要环境因子为饱和水汽压差、太阳辐射、平均气温、0—40 cm 土壤质量含水量和 40—120 cm 土壤质量含水量;蒸腾耗水较高时, 刺槐主要吸收利用中层土壤水, 丝绵木主要吸收利用浅层土壤水, 蒸腾耗水较低时, 刺槐主要吸收利用浅层土壤水, 丝绵木主要吸收利用中层土壤水;在土壤水分含量较小的月份, 刺槐和丝绵木主要通过水分利用空间上的差异来应对干旱, 维持自身的蒸腾耗水;土壤水分含量较高的月份, 刺槐和丝绵木的相似性比例指数最大, 存在较强的水分竞争关系;浅层土壤水分含量较高可能反映了沙区植物根系对土壤水分再分配作用下植物在水分和养分需求之间的平衡。

关键词:蒸腾耗水;水分来源;水分利用关系;氢氧稳定同位素;防护林;沙区

Water use strategies of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia, China

LIU Lili^{1,2,3}, HAN Lei^{1,2,3,*}, GAO Yang^{1,2,3}, PENG Ling⁴, WANG Ren⁵, WANG Nana^{1,2,3}, ZHOU Peng⁴, ZHAN Xiuli^{1,2,3}

1 School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China

3 Key Laboratory of Resource Evaluation and Environmental Regulation in Arid Region of Ningxia, Yinchuan 750021, China

4 College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

5 Ningxia Lingwu Baijitan National Nature Reserve Administration, Yinchuan 751400, China

Abstract: The mixed forest of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* is the typical shelterbelt construction mode in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia, China. Research on the water use strategies of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* could provide scientific basis for restoration regional vegetation and stand structure optimization

基金项目:国家自然科学基金项目(31760236, 42161013);宁夏自然科学基金项目(2022AAC03094)

收稿日期:2022-02-10; **网络出版日期:**2022-08-23

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

allocation of shelter forest. In this study, the sap flow of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* was monitored continuously to clarify the characteristics of water consumption by transpiration which calculated by Granier and its correction formula, as well as simultaneous records of micro-meteorological factors and gravimetric soil water content. Combined with stable hydrogen and oxygen isotope analysis of rainfall, soil water and plant xylem water, the water source and water use relationship among symbiotic trees were quantitatively analyzed by Bayesian mixture model (MixSIAR) and the proportional similarity index (PS). The results showed that the water consumption of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* were higher in the middle growing season, but lower in the early and late growing season. The water consumption of *Robinia pseudoacacia* was 1.55 times larger than *Euonymus bungeanus*. The main environmental factors affecting water consumption of *Robinia pseudoacacia* were vapour pressure deficit, solar radiation, 0—40 cm gravimetric soil water content and 40—120 cm gravimetric soil water content. The main environmental factors affecting water consumption of *Euonymus bungeanus* were vapour pressure deficit, solar radiation, average temperature, 0—40 cm gravimetric soil water content and 40—120 cm gravimetric soil water content. *Robinia pseudoacacia* mainly used the middle layer soil water and *Euonymus bungeanus* mainly used the shallow layer soil water in the season with high water consumption. While the shallow layer soil water and the middle layer soil water were utilized by *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* separately in the season with lower tree water consumption. In addition, *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* was able to deal with drought and maintain their own water consumption mainly through the spatial difference of water use strategy under drought seasons. In the seasons when gravimetric soil water content was higher, the proportional similarity index (PS) of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* was the highest, and there was a strong water competition relationship. The higher of shallow layer gravimetric soil water content might reflect a trade-off between water and nutrient requirements of plants under the effect of soil water redistribution by plant roots in the sandy land.

Key Words: water consumption; water source; water use relationship; stable hydrogen and oxygen isotopes; shelter forest; sandy land

全球变暖加速了地球系统的水循环,改变了全球和区域的降水格局^[1]。水分是限制干旱半干旱地区人工植被生长的关键因素,植物对水分的可利用程度和利用模式反映了生态系统对环境水分状况的响应,并随着全球气候变化而发生改变,同时森林植被也对陆地生态系统的水分运移和循环过程产生重要影响^[2]。在干旱沙区,水文过程决定沙区土壤-植被系统的演化方向和生态功能^[3],因对植物水分利用的研究是系统认识沙区防护林树种的生存适应性和固沙植被遴选的关键。由于防护林建设改变了原来沙区的水量平衡和土壤水分的空间分布格局^[4],因此,确定干旱半干旱地区植物水分利用机制对沙区人工植被建设至关重要。

蒸腾耗水是植物水分利用最主要的形式^[5],也是水分在 SPAC 系统中运移的关键环节^[6],研究植物在生长季不同时期的蒸腾耗水过程有助于了解防护林树种对该地区干旱环境的响应^[7-8]。有研究表明旱季的蒸腾耗水量高于雨季^[9],也有研究发现蒸腾耗水的季节性差异较小^[10],还有研究发现旱季蒸腾耗水减少是由于降水量和土壤含水量的降低^[11],如果旱季足够长,表层土壤含水量可能会限制植物生长^[12],但土壤含水量是否对蒸腾耗水产生影响取决于植物的吸水深度。

稳定同位素技术为探究植物水分来源提供了一种新思路,植物木质部水的稳定氢氧同位素特征表征了根系对具有不同同位素特征的水源的综合响应,将同位素示踪法与茎流计相结合能够阐明土壤-植物系统的水分传输动态^[13],Jackson 等^[14]研究发现巴罗克罗拉多岛热带雨林在旱季通过获取深层土壤水来维持蒸腾耗水,雨季通过获取浅层土壤水来维持蒸腾耗水,甚至旱季蒸腾耗水量会增加。类似地,Schwendenmann 等^[15]调查了巴拿马中部一个实验种植园树木的季节性吸水模式,发现能够利用深层土壤水的树种在旱季可以保持较高的蒸腾耗水量,此外,该研究结果增加了树种间用水互补策略的一些证据。Muñoz-Villers 等^[16]研究发现墨西哥韦拉克鲁斯中部热带山地森林蒸腾耗水减少与浅层土壤水分利用相耦合。Wu 等^[17]研究发现中国西

南部喀斯特地区女贞的蒸腾耗水不仅受浅层土壤水分分布状况的影响,还受深层水源的影响。不同类型植物的蒸腾耗水特征及蒸腾耗水的水分来源因植物、水分条件、种植模式、生境等的不同而存在差异,因而有必要对沙区防护林树种在混交模式下的蒸腾耗水特征及蒸腾耗水的水分来源展开进一步研究。

宁夏河东沙区气候干旱、生态脆弱,水分是沙区植被恢复的主要限制因子,刺槐和丝绵木混交林是该地区防护林建设的主要模式。刺槐和丝绵木在生长季不同阶段的蒸腾耗水特征是怎样的;2种植物蒸腾耗水的水分来源分别是什么,它们的水分来源是否存在差异;2个树种之间有怎样的水分利用关系,体现了怎样的用水策略;刺槐和丝绵木混交模式对该地区土壤水分环境是否有影响,这些问题还有待研究。因此,本研究于2018年5—10月在灵武市白芨滩自然保护区内刺槐和丝绵木人工林中通过微气象、树干液流、土壤质量含水量监测以及大气降水、植物木质部水、土壤水氢氧稳定同位素组成的测定研究了刺槐和丝绵木在生长季不同月份的蒸腾耗水特征、蒸腾耗水的水分来源、2树种的水分利用关系,以期阐明刺槐和丝绵木的用水策略以及刺槐和丝绵木混交林模式对该地区土壤水分环境的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于宁夏回族自治区银川市灵武市白芨滩自然保护区内(38°03' N, 106°22' E, 海拔: 1150—1650 m)(图1),位于毛乌素沙地西南缘,属于温带大陆性气候,年平均气温 8—9℃,年平均降水量 192.9 mm^[18]。该区域生态环境脆弱,植被稀疏,自然植被以沙生植物为主,包括沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、白草(*Pennisetum centrasaticum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)等,人工植被主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、丝绵木(*Euonymus bungeanus*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、新疆杨(*Populus bolleana*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)等,土壤以灰钙土和风沙土为主^[19]。地下水位 20—25 m。研究区表层土壤养分含量较高,随着土壤深度的增加,土壤养分含量逐渐减小,深层土壤养分含量最小,土壤 pH 介于 7.65—8.00 之间。

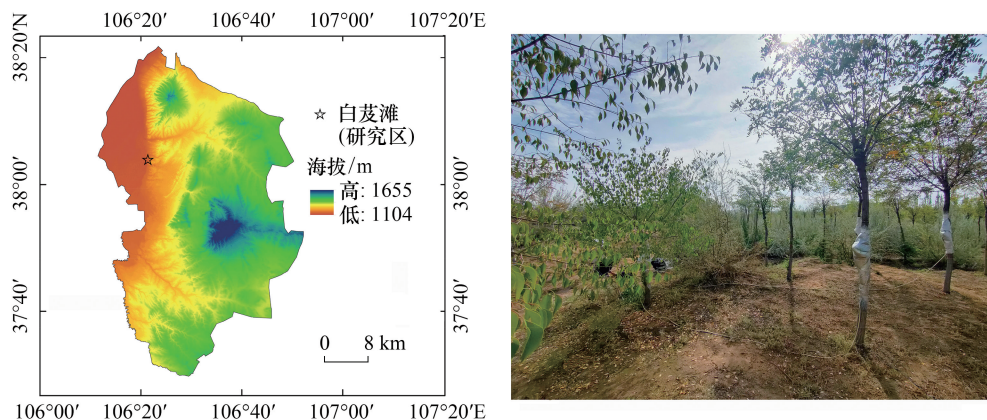


图1 研究区位置和采样点林地景观图

Fig.1 Location of the study area and woodland landscape of sampling site

1.2 研究方法

1.2.1 试验材料

以白芨滩自然保护区林地野外长期固定监测为基础,选取刺槐(*Robinia pseudoacacia*)×丝绵木(*Euonymus bungeanus*)混交林为研究对象,林龄为 14 年,混交方式为行间混交,株行距为 3 m×3 m (1111 株/hm²),刺槐和丝绵木的密度分别为 555 株/hm²和 556 株/hm²。样木调查在 2018 年 4 月份进行,样木基本信息见表 1。

表 1 样木基本特征

Table1 Basic characteristics of sample wood

树种 Tree species	树高 Tree height/m	冠幅 Crown area/m ²	胸径 Diameter at breast height/cm	边材面积 Sapwood area/cm ²
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	4.83±0.19	7.07±3.31	7.20±0.76	28.89±5.31
丝绵木 <i>Euonymus bungeanus</i>	3.08±0.63	3.53±1.01	6.45±1.19	19.46±2.60

1.2.2 小气候监测

采用美国 Vantage Pro 2 自动气象站 (Davis Inc., USA), 气象站安装在距林地 50 m 左右的空旷地内, 代表林外气候特征, 传感器安装在冠层上部, 同时确保周围无杂物和树木等的遮挡。数据采集器每 15 min 记录一次降水量、气温、相对湿度、风速等气象数据。同时, 根据以下公式计算每小时的饱和水汽压差 (VPD)^[17]:

$$VPD = 0.611 \times \exp\left(\frac{17.502 \times T}{T + 24.97}\right) \times (1 - RH) \quad (1)$$

式中, VPD 为饱和水汽压差 (kPa), T 为气温 (°C), RH 为相对湿度。

1.2.3 样品采集

采样时间为 2018 年 5—10 月, 土壤和植物样品每月上、中、下旬分别进行一次采样, 降水样品采集单次雨量超过 4 mm 的降水。所有样品均取 3 个重复, 采集的样品在一个月内完成本月所有样品的抽提。

分别选取 3 株长势良好、冠幅、胸径较一致的刺槐和丝绵木作为研究对象, 剪取阳面直径约 4 mm, 长约 4—5 cm 的非绿色枝条, 将植物的韧皮部迅速剥离后装入冷冻管中, 并用 Parafilm 膜密封, 放入装有冰袋的保温箱中, 带回实验室抽提植物水分。

在距所选植株 1 m 左右位置进行土壤样品的采集, 取 3 个样点混合。用土钻钻取土壤样品, 取样间隔为 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—120 cm、120—160 cm 和 160—200 cm, 将采集的鲜土样品一部分装入标记好的自封袋中, 放入保温箱, 迅速带回实验室冷冻 (−20℃) 保存, 另一部分装入铝盒中, 用于土壤质量含水量的测定, 同时, 采集上述土层的扰动土用于测定土壤的基本物理性质。

在无林旷地内随机布设 2 个标准雨量筒 (直径 20 cm 圆桶上放置漏斗, 下端与雨量筒相连, 漏斗内放置乒乓球防止雨水蒸发^[20]) 对次降水进行收集。在每次降水过程结束后将收集到的有效次降水样品混合, 立即装入冷冻管中, 并迅速用 Parafilm 封口膜密封瓶口, 放入保温箱, 带回实验室, 经 0.45 μm 滤膜过滤后, 冷冻 (−20℃) 保存待测。

表 2 土壤基本物理性质

Table2 Basic physical properties of the studied soils

土壤深度 Soil depth/cm	容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	土壤机械组成 Soil mechanical composition/%				
		黏粒 Clay (<0.002 mm)	粉粒 Silt (0.002—0.05 mm)	极细砂粒 Very fine sand (0.05—0.10 mm)	细砂粒 Fine sand (0.10—0.25 mm)	中砂粒 Medium sand (0.25—0.5 mm)
0—10	1.71±0.09	0.64±0.02	6.29±0.34	19.33±1.06	67.46±0.92	6.31±0.48
10—20	1.68±0.23	0.86±0.05	6.81±0.13	16.28±0.14	66.64±0.04	9.35±0.05
20—40	1.68±0.32	1.09±0.05	8.37±0.09	21.53±0.56	63.84±0.46	5.22±0.81
40—60	1.67±0.08	4.98±0.22	43.01±0.07	16.32±0.48	26.59±0.15	9.13±0.96
60—80	1.70±0.35	4.96±0.32	40.35±0.08	16.32±0.32	26.89±0.76	11.48±0.02
80—120	1.69±0.19	4.43±0.34	36.78±0.20	12.87±0.09	32.89±0.35	13.03±0.68
120—160	1.66±0.32	3.09±0.22	12.35±0.12	20.09±0.08	60.32±0.78	4.15±0.06
160—200	1.67±0.23	2.83±0.21	15.32±0.02	16.98±0.76	60.34±0.02	4.53±0.67

1.2.4 样品分析

采用全自动真空冷凝抽提系统 (LI-2100, LICA) 抽取植物水和土壤水, 同位素测定采用 Off-Axis ICOS 高

分辨率离轴积分腔输出光谱技术的 LWA-45EP 激光水稳定性同位素分析仪测定,光谱污染校正采用文献^[21]的方法,修正水样中有机污染物的干扰。测定结果与 VSMOW 标准(Vienna Standard Mean Ocean Water)比对后计算出样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}(\delta\text{D})$ 值, $\delta^{18}\text{O}$ 的精确度为 $\pm 0.1\text{‰}$, δD 的精确度为 $\pm 0.5\text{‰}$ 。

分析得出的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值以相对维也纳标准平均海洋水(Vienna Standard Mean Ocean Water, 简称 VSMOW)的千分差值表示:

$$\delta X = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中, δX 为 δD 或 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$, R_{sample} 为水样中的稳定同位素比率, R_{VSMOW} 为平均海洋水中的稳定同位素比率 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = (2005.2 \pm 0.45) \times 10^{-6}$, $\text{D}/\text{H} = 1.56 \times 10^{-4}$)^[22]。

土壤基本物理性质测定。采用烘干法(105°C)测定土壤质量含水量,土壤容重采用环刀法进行测定,土壤机械组成采用粒径分析仪测定。

1.2.5 树干液流测定与蒸腾耗水量计算

液流持续监测的样木和同位素取样的样木一致。液流速率测定采用热扩散式茎流计(SF-L, Ecomatic Ltd., German)进行持续监测,数据采集器(CR-1000, Campbell Scientific Co.Ltd., USA)每隔 15 min 自动记录一次数据。为避免阳光直射引起热效应,探针安装在树干北部 1.3 m 高处,并外裹铝箔。

由于 Granier 公式在计算环孔材(如刺槐)液流密度时会较大地低估其真实的液流密度,而在计算散孔材(如丝绵木)液流密度时与其真实液流值相差不大^[23],因此,采用 Granier 公式计算丝绵木树干液流密度 $J_s(\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ ^[24],具体公式为:

$$J_s = 0.0119 \times \left(\frac{DT_{\text{max}} - DT}{DT} \right)^{1.231} \quad (3)$$

采用 Granier 的校正公式计算刺槐树干液流密度 $J_s(\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ ^[25],具体公式为:

$$J_s = 0.051 \times \left(\frac{DT_{\text{max}} - DT}{DT} \right)^{1.18} \quad (4)$$

式中, J_s 为单株液流密度($\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), DT_{max} 为树干木质部液流为 0 时两探针间的温度差($^\circ\text{C}$), DT 为两探针间的瞬时温差($^\circ\text{C}$),单株日耗水量为:

$$E_h = \frac{J_s \times A_s \times 3600 \times 24}{1000} \quad (5)$$

式中, E_h 为单株日耗水量(kg/d), A_s 为边材面积(cm^2)。

1.2.6 蒸腾耗水的归因分析

偏微分方程方法被认为是量化几个独立变量对一个因变量的贡献的有效工具,并被广泛应用于水文和气候领域的归因分析^[26]。环境因子对蒸腾耗水的贡献率可通过计算偏导数乘以环境因子的月趋势得出,具体公式如下:

$$\begin{aligned} \frac{dE_h}{dt} = & \frac{\partial E_h}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial E_h}{\partial R_s} \frac{dR_s}{dt} + \frac{\partial E_h}{\partial \text{VPD}} \frac{d\text{VPD}}{dt} + \frac{\partial E_h}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\partial E_h}{\partial \text{SMC}_{0-40}} \frac{d\text{SMC}_{0-40}}{dt} + \\ & \frac{\partial E_h}{\partial \text{SMC}_{40-120}} \frac{d\text{SMC}_{40-120}}{dt} + \frac{\partial E_h}{\partial \text{SMC}_{120-200}} \frac{d\text{SMC}_{120-200}}{dt} + \varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

式中, E_h 为月单株耗水量(kg), T 为月平均温度($^\circ\text{C}$), R_s 为月太阳辐射(W m^{-2}), VPD 为饱和水汽压差(kPa), P 为月降水量(mm), SMC_{0-40} 为 0—40 cm 的土壤质量含水量(%), SMC_{40-120} 为 40—120 cm 的土壤质量含水量(%), $\text{SMC}_{120-200}$ 为 120—200 cm 的土壤质量含水量(%).

公式(6)可以简化为:

$$L_{Eh} = Cr_T + Cr_{R_s} + Cr_{\text{VPD}} + Cr_P + Cr_{\text{SMC}_{0-40}} + Cr_{\text{SMC}_{40-120}} + Cr_{\text{SMC}_{120-200}} + \varepsilon \quad (7)$$

式中, L_{E_h} 是 E_h 的月变化趋势, Cr_T 、 Cr_{R_s} 、 Cr_{VPD} 、 Cr_P 、 $Cr_{SMC_{0-40}}$ 、 $Cr_{SMC_{40-120}}$ 、 $Cr_{SMC_{120-200}}$ 分别是 T 、 R_s 、 VPD 、 P 、 SMC_{0-40} 、 SMC_{40-120} 、 $SMC_{120-200}$ 的变化对 E_h 的贡献率, ε 是环境因子对 E_h 的总贡献率 (Cal_{E_h}) 和 L_{E_h} 之间的相对误差。

1.2.7 量化不同深度土壤水分贡献率

采用 MixSIAR 模型, 量化植物对各潜在水源的利用率。本文输入的源数据包括 0—40 cm、40—120 cm、120—200 cm 的土壤水同位素数据, 混合物数据为刺槐、丝绵木的植物茎秆水同位素数据。分馏数据设置为“0”, 马尔卡夫链蒙特卡罗运行步长设置为“long”, 模型误差选取“Process only”, 在接受模型最终的输出前, 需要判断模型是否收敛, Gelman-Rubin 和 Geweke 测试用于确定模型是否接近收敛^[21]。

1.2.8 相似性比例指数 (PS)

PS 指数是表征生物之间生态位重叠的指标, PS 指数越大表明 2 个物种之间生态位重叠的越多, 对同一资源的竞争越大; PS 指数越小表明 2 个物种之间生态位重叠不明显, 对同一资源的竞争越小^[27]。本研究用 PS 指数来评估刺槐和丝绵木的水分利用情况。

$$PS = 1 - 0.5 \sum_{i=1}^n |P_{1i} - P_{2i}| \quad (8)$$

式中, P_{1i} 和 P_{2i} 分别表示相比较的两种植物对第 i 种水源的利用比例。

1.3 数据处理

本文采用 SPSS 单因素方差分析对各土层的 $\delta^{18}O$ 值进行分析, 合并相邻土层, 并取平均值作为新土层的同位素值, 最终将土层合并为浅层土 (0—40 cm)、中层土 (40—120 cm) 和深层土 (120—200 cm), 采用直观对比法定性分析刺槐和丝绵木的主要吸水层位, 用 MixSIAR 模型计算各潜在水源对刺槐和丝绵木的贡献率, 采用相似性比例指数 (PS) 分析刺槐和丝绵木之间的水分利用关系, 用 Origin 2018 和 Visio 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 林地气温、降水及土壤质量含水量特征

如图 2 所示, 研究区 2018 年生长季总降水量 162.6 mm, 7 月份降水量与平均气温均达到最大值, 降水量变化情况为: 7 月 (73 mm) > 8 月 (33.4 mm) > 9 月 (25.7 mm) > 5 月 (20 mm) > 10 月 (8.7 mm) > 6 月 (1.8 mm); 平均气温变化情况为: 7 月 (24.9℃) > 8 月 (23.5℃) > 6 月 (22.9℃) > 5 月 (19.1℃) > 9 月 (14.5℃) > 10 月 (9.9℃)。土壤质量含水量月均变化情况为: 10 月 (8.34±0.38)% > 9 月 (7.21±0.34)% > 8 月 (6.66±0.36)% > 7 月 (5.55±0.38)% > 6 月 (4.47±0.29)% > 5 月 (4.36±0.36)%。5 月和 6 月土壤质量含水量随土壤深度变化情况基本一致, 随着土层深度增加土壤质量含水量逐渐减小, 表层土壤质量含水量较大, 皆在 20 cm 处达到最大

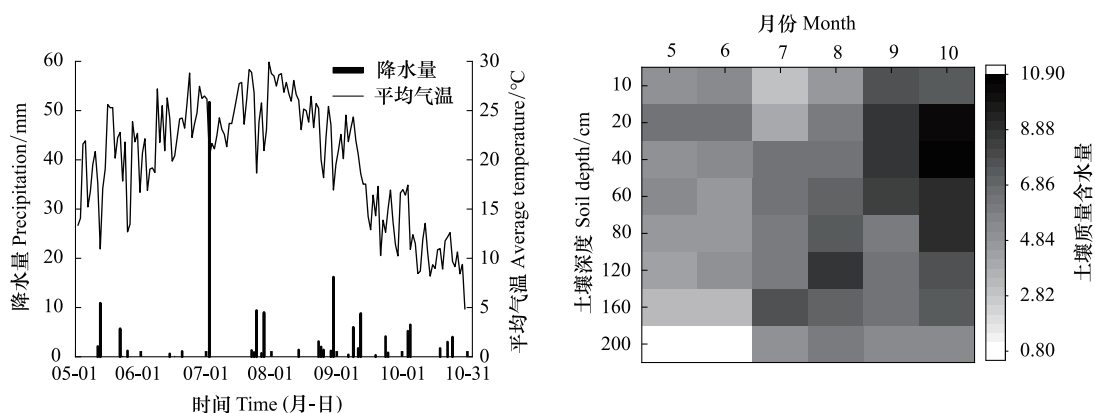


图 2 研究区降水量 (mm)、气温 (°C) 和土壤剖面质量含水量 (%) 月变化

Fig.2 Monthly changes of precipitation (mm), air temperature (°C) and gravimetric water content of soil profile (%) in the study area

值;7、8月份土壤质量含水量呈现出先增加再降低的趋势,分别于160、120 cm处达到最大值;9、10月份土壤质量含水量呈现出先增加再降低的趋势,分别于20—60、20—40 cm处达到最大值。

2.2 刺槐和丝绵木蒸腾耗水特征及其主要影响因素

由图3可知,整体上,生长季刺槐蒸腾耗水量高于丝绵木,刺槐月均蒸腾耗水量为50.57 kg,丝绵木月均蒸腾耗水量为32.71 kg,刺槐蒸腾耗水量为丝绵木蒸腾耗水量的1.55倍。刺槐7月份蒸腾耗水量最大,为70.15 kg,其次为8、9、5、6和10月,分别为66.97、51.96、45.94、45.17和30.01 kg;丝绵木7月份蒸腾耗水量最大,为46.32 kg,其次为8、9、6、5和10月,分别为43.31 kg、33.08 kg、27.10 kg、25.89 kg和19.84 kg。5—10月,刺槐月蒸腾耗水量分别占生长季蒸腾耗水总量的15.1%、14.9%、23.1%、22%、14.9%和9.9%,丝绵木月蒸腾耗水量分别占生长季蒸腾耗水总量的13.2%、13.8%、23.6%、22%、17.2%和10.1%。

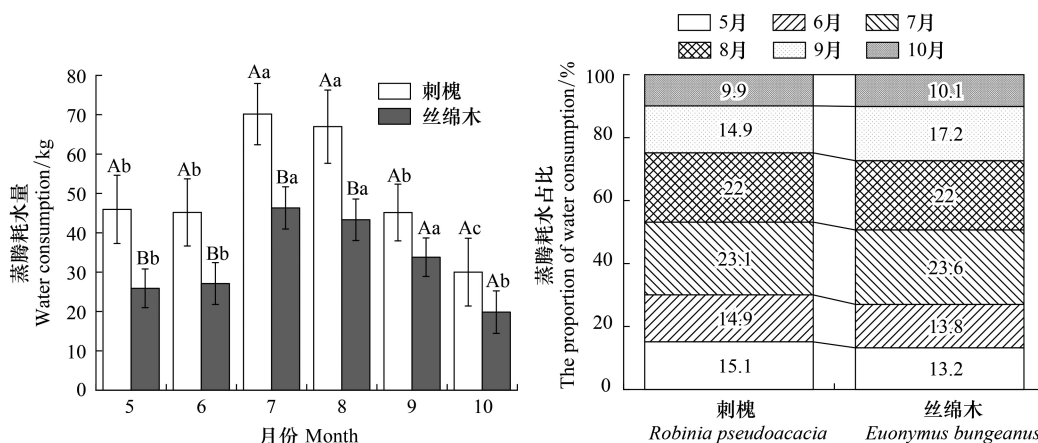


图3 不同月份刺槐和丝绵木蒸腾耗水量及蒸腾耗水占比

Fig.3 Water consumption and the proportion of water consumption of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* in different months

Rp: 刺槐 *Robinia pseudoacacia*; Eb: 丝绵木 *Euonymus bungeanus*; 图中不同大写字母表示同一月份不同树种间差异显著,不同小写字母表示同一树种不同月份间差异显著 ($P < 0.05$)

由表3可知,在整个生长季,影响刺槐和丝绵木蒸腾耗水的主要环境因子为VPD、太阳辐射、0—40 cm的浅层土壤质量含水量和40—120 cm的中层土壤质量含水量。5、6月份,刺槐蒸腾耗水的主要影响因子为VPD、太阳辐射和0—40 cm的浅层土壤质量含水量,丝绵木蒸腾耗水的主要影响因子为VPD、太阳辐射和40—120 cm的中层土壤质量含水量;7、8月份,刺槐蒸腾耗水的主要影响因子为平均温度、太阳辐射、VPD、和40—120 cm的中层土壤质量含水量,丝绵木蒸腾耗水的主要影响因子为平均温度、太阳辐射、VPD和0—40 cm的浅层土壤质量含水量;9、10月份,影响刺槐和丝绵木蒸腾耗水的主要环境因子为VPD、太阳辐射和40—120 cm的土壤质量含水量。

2.3 刺槐和丝绵木的根系吸水土层和水分利用率

如图4所示,由研究区降水同位素数据得出研究区大气降水线方程(LMWL)为: $\delta D = 6.62\delta^{18}O - 2.50$ ($R^2 = 0.878, P < 0.05$),其斜率小于全球大气降水线方程(GMWL): $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ [21],表明本研究区气候干燥,蒸发较强。降水同位素的变化范围为: $\delta^{18}O$ 为 $(-10.51 \pm 0.95)\text{‰}$ — $(-1.93 \pm 0.34)\text{‰}$, δD 为 $(-74.11 \pm 4.37)\text{‰}$ — $(-10.53 \pm 3.42)\text{‰}$,变化浮动较大。土壤水线方程(SWL)为 $\delta D = 3.70\delta^{18}O - 34$ ($R^2 = 0.849, P < 0.05$),且斜率和截距均小于本地大气降水线,土壤水受到了二次蒸发的影响。土壤水同位素的变化范围为: $\delta^{18}O$ 为 $(-8.58 \pm 0.78)\text{‰}$ — $(2.65 \pm 0.42)\text{‰}$, δD 为 $(-67.45 \pm 6.53)\text{‰}$ — $(-30.21 \pm 4.24)\text{‰}$ 。丝绵木茎秆水同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ 为 $(-7.96 \pm 0.76)\text{‰}$ — $(-5.00 \pm 0.36)\text{‰}$, δD 为 $(-66.12 \pm 5.66)\text{‰}$ — $(-59.06 \pm 7.64)\text{‰}$;刺槐茎秆水同位素变化范围为: $\delta^{18}O$ 为 $(-7.34 \pm 0.74)\text{‰}$ — $(-5.24 \pm 0.68)\text{‰}$, δD 为 $(-65.53 \pm 7.66)\text{‰}$ — $(-55.01 \pm 5.66)\text{‰}$ 。丝绵木和刺槐茎秆水的同位素值皆分布于土壤水线附近,表明两种植物在生长过程中主要利用土壤水。

表 3 环境因子对刺槐和丝绵木蒸腾耗水的贡献率

Table3 Contribution rate of environmental factors to water consumption of <i>Robinia pseudoacacia</i> and <i>Euonymus bungeanus</i>											
树种 Tree species	月份 Month	Cal_{Eh}	L_{Eh}	$\varepsilon/\%$	Cr_T	Cr_{Rs}	Cr_{VPD}	Cr_P	$Cr_{SMC0-40}$	$Cr_{SMC40-120}$	$Cr_{SMC120-200}$
<i>Rp</i>	5	0.416	0.400	4.1	0.074	0.091	0.094	-0.078	0.096	0.075	0.064
	6	0.419	0.380	10.3	0.079	0.089	0.085	-0.074	0.094	0.082	0.064
	7	0.430	0.420	2.4	0.088	0.084	0.096	-0.067	0.062	0.094	0.073
	8	0.411	0.410	0.2	0.080	0.072	0.091	-0.063	0.065	0.097	0.069
	9	0.368	0.346	6.4	0.055	0.072	0.082	-0.046	0.061	0.091	0.053
	10	0.331	0.332	-0.3	0.078	0.066	0.085	-0.059	0.062	0.093	0.046
<i>Eb</i>	5	0.423	0.421	0.5	0.075	0.092	0.088	-0.073	0.073	0.096	0.072
	6	0.409	0.403	1.5	0.067	0.091	0.092	-0.054	0.066	0.093	0.074
	7	0.444	0.421	5.5	0.086	0.085	0.094	-0.067	0.098	0.075	0.073
	8	0.422	0.419	0.7	0.095	0.070	0.095	-0.091	0.096	0.083	0.075
	9	0.406	0.390	4.1	0.080	0.085	0.085	-0.073	0.076	0.089	0.064
	10	0.294	0.293	0.2	0.014	0.081	0.075	-0.015	0.047	0.088	0.024

Rp:刺槐 *Robinia pseudoacacia*; *Eb*:丝绵木 *Euonymus bungeanus*; Cal_{Eh} :环境因子对蒸腾耗水的贡献率之和 Sum of contribution rates of environmental factors to water consumption; L_{Eh} :蒸腾耗水的月变化趋势 Monthly variation trend of water consumption; ε :环境因子对蒸腾耗水的贡献率之和与蒸腾耗水的月变化趋势之间的相对误差 The relative error between the sum of contribution rates of environmental factors to water consumption and the monthly variation trend of water consumption; Cr_T :平均气温对蒸腾耗水的贡献率 Contribution rate of average temperature to water consumption; Cr_{Rs} :太阳辐射对蒸腾耗水的贡献率 Contribution rate of solar radiation to water consumption; Cr_{VPD} :饱和水汽压差对蒸腾耗水的贡献率 Contribution rate of vapour pressure deficit to water consumption; Cr_P :降水对蒸腾耗水的贡献率 Contribution rate of precipitation to water consumption; $Cr_{SMC0-40}$:0—40 cm 土壤质量含水量对蒸腾耗水的贡献率 Contribution rate of 0—40 cm gravimetric soil water content to water consumption; $Cr_{SMC40-120}$:40—120 cm 土壤质量含水量对蒸腾耗水的贡献率;Contribution rate of 40—120 cm gravimetric soil water content to water consumption; $Cr_{SMC120-200}$:120—200 cm 土壤质量含水量对蒸腾耗水的贡献率;Contribution rate of 120—200 cm gravimetric soil water content to water consumption

如图 5 所示,土壤水 $\delta^{18}O$ 值随着土壤深度增加呈现出先减少再增加的趋势。本研究区植物的潜在水源为浅层土壤水(0—40 cm)、中层土壤水(40—120 cm)和深层土壤水(120—200 cm)。与刺槐和丝绵木木质部水 $\delta^{18}O$ 值有交点的土壤层位即为刺槐和丝绵木的主要吸水层位。因此,5、6 月刺槐主要利用浅层土壤水,丝绵木主要利用中层和深层土壤水;7、8 月刺槐主要利用中层和深层土壤水,丝绵木主要利用中层和浅层土壤水;9、10 月刺槐和丝绵木均主要利用浅层和中层土壤水。

如图 6 所示,从整个生长季来看,刺槐和丝绵木主要利用中层土壤水,利用率分别为 37.2%、37.3%,两树种对深层土壤水的利用率最小,分别为 31%、30.1%,但不同土层土壤水对刺槐和丝绵木的贡献率在各月存在差异。生长季前期(5—6 月),刺槐吸收利用的水分 72.6%—75.4%来自 120 cm 以上土层且主要依赖于浅层土壤水;丝绵木吸收利用的水分 73.1%—77.5%来自 40 cm 以下土层且主要依赖于中层土壤水。生长季中期(7—8 月),刺槐吸收利用的水分 72%—76.25%来自 40 cm 以下土层且主要依赖于中层土壤水;丝绵木吸收利用的水分 74.6%—76.6%来自 120 cm 以上土层且主要依赖于浅层土壤水。生长季后期(9—10 月),刺槐和

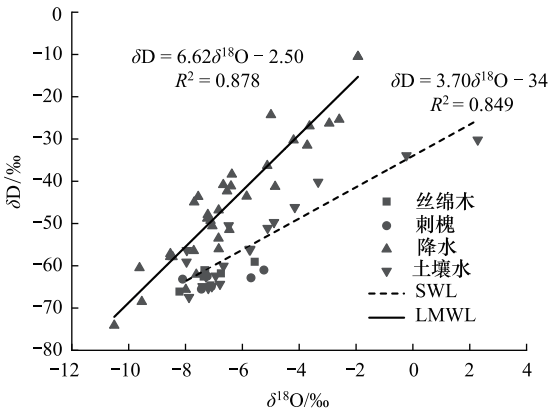


图 4 研究区大气降水线、土壤水线及植物木质部水和土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 分布特征

Fig.4 Local meteoric water line, soil water line and distribution characteristics of δD and $\delta^{18}O$ of stem water and soil water in the study area

SWL:土壤水线 Soil water line; LMWL:本地大气降水线 Local meteoric water line

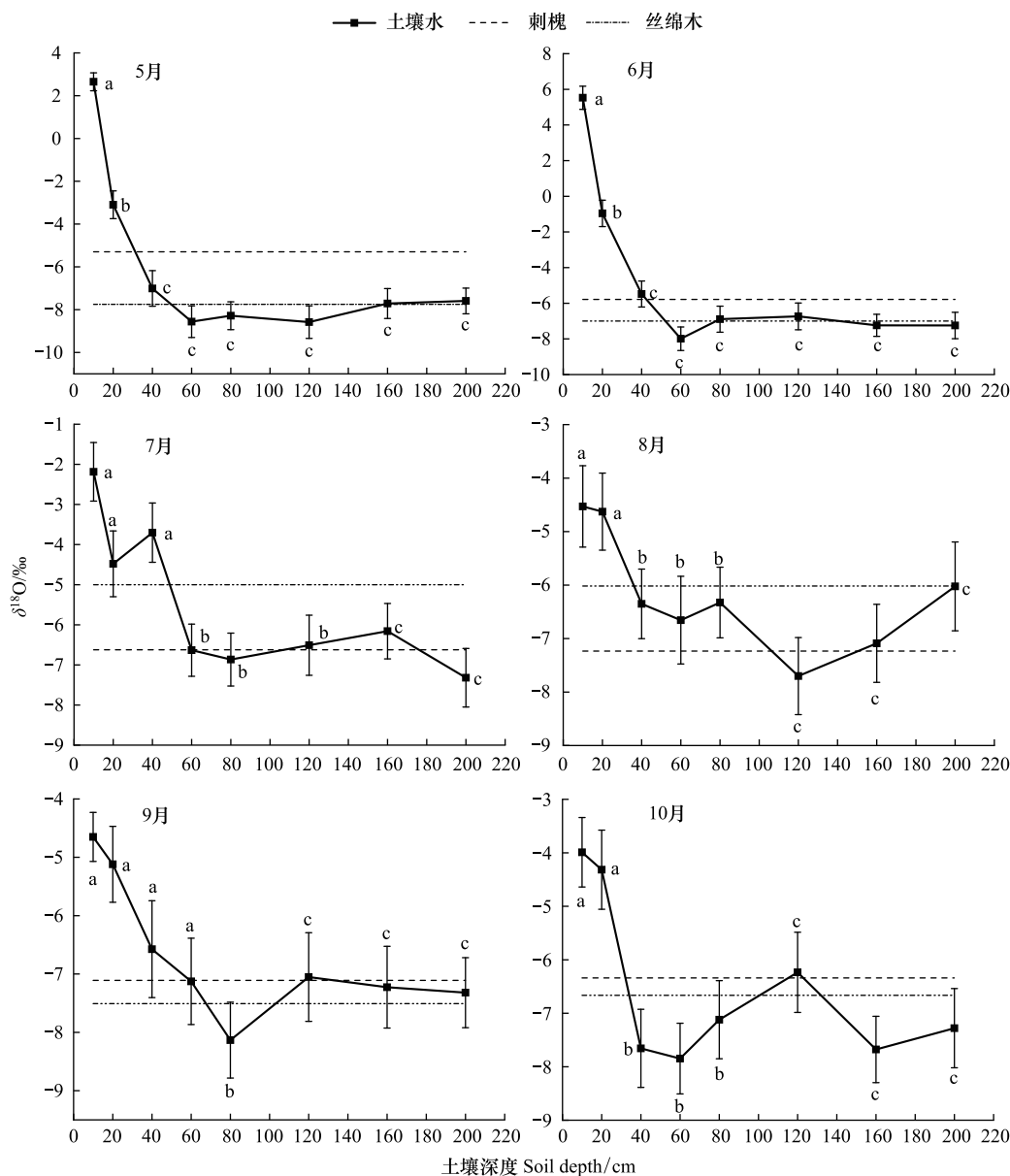


图5 不同月份潜在水源和植物木质部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比较

Fig.5 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ of potential water source and plant xylem water in different months

图中不同小写字母表示土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在不同土层间差异性显著 ($P < 0.05$)

丝绵木吸收利用的水分 72.4%—73.2%和 74.5%—75.1%来自 120 cm 以上土层且主要依赖于中层土壤水。

2.4 植物间水分利用竞争关系

在干旱半干旱地区,植物对水资源的竞争是一种普遍存在的现象,如表 4 所示,整个生长季,刺槐和丝绵木的 PS 指数为 87%,表明刺槐和丝绵木的水分利用存在竞争关系,但不同月份刺槐和丝绵木的水分利用关系存在差异。其中,9、10 月份 PS 指数最大,表明 9、10 月刺槐和丝绵木的水分来源一致,水分利用模式基本相同,水分竞争关系最强;8 月 PS 指数最小,表明刺槐和丝绵木的主要水分来源不同,水分利用模式不同,水分竞争关系最弱。5、6 和 7 月份 PS 指数较小,表明刺槐和丝绵木水分利用模式有所差异,水分竞争关系较弱。

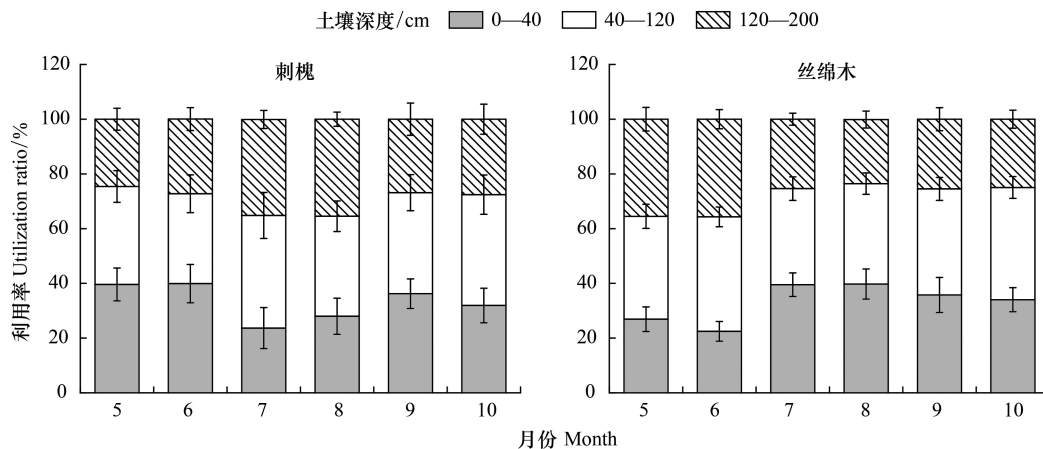


图6 不同月份植物对各潜在水源的利用率

Fig.6 Proportion of potential water source for plant in different months

表4 不同月份刺槐和丝绵木的 PS 指数

Table 4 PS index between *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* in different months

月份 Month	5	6	7	8	9	10
PS 指数 PS index/%	86	85	84	82	98	96

PS:相似性比例指数 Proportional similarity index;PS=0 表示两树种之间不存在竞争关系;PS 指数介于 0—100%之间表示两树种存在竞争关系,并且 PS 指数越大竞争关系越强;PS=100%表示两树种竞争关系达到最大

3 讨论

3.1 刺槐和丝绵木的蒸腾耗水特征及其对环境因子的响应

本研究发现,刺槐的蒸腾耗水量为丝绵木的 1.55 倍,并且 2 个树种的蒸腾耗水量在生长季中期最高,前期和后期较小。在生长季前期(5—6 月),研究区降水量较少,土壤水分含量较小,在这种干旱的情况下,需要少量的蒸腾作用来维持植物生长^[28],刺槐和丝绵木的蒸腾耗水量较小,但在生长季中期(7—8 月),随着降雨量增加,土壤水分环境得到改善,蒸腾耗水量增加,高的蒸腾耗水在生长季中期非常重要,能够降低植物叶片温度,有助于光合作用和植物生长^[29]。影响刺槐和丝绵木蒸腾耗水的主要环境因子为 VPD、太阳辐射、平均气温、0—40 cm 和 40—120 cm 的土壤质量含水量。土壤水分分为 2 个树种的蒸腾作用提供了物质基础,太阳辐射、平均气温、VPD 为蒸腾作用提供了能量和拉力基础^[30],5、6 月份,土壤水分含量较低,加上饱和水汽压差较小,植物的蒸腾作用较弱。7、8 月份,VPD 增加导致气孔导度增加,使得水分子从植物叶片中进一步逸出增加了蒸腾作用^[31],平均气温升高促进了光合作用和植物生长^[17],导致蒸腾耗水增加,在该时期,刺槐和丝绵木的蒸腾作用分别对浅层和中层的土壤水分较敏感,大量降雨会较高频率的定期补充土壤水,将土壤的干旱胁迫保持在最低限度。生长季末期,植物的生理生长缓慢^[32],土壤水分含量虽然较高,但植物吸收利用的较少,同时,太阳辐射和 VPD 减少,使得蒸腾作用减弱。

3.2 刺槐和丝绵木水分来源的差异及水分利用关系

本研究发现,在整个生长季,刺槐和丝绵木对浅层和中层土壤水利用率最高,对深层土壤水利用率最小,刺槐和丝绵木根系主要分布于浅层和中层(图 7),根系是植物获取土壤水分的重要器官,刺槐和丝绵木的根系分布特征在一定程度上决定了 2 个树种的水分来源。在干旱沙区,植物对土壤水分的变化比较敏感,能够根据土壤水分的变化及时调整自身的水分利用策略,吸收利用稳定的中、深层土壤水的植物具有更强的生存能力^[23]。在生长季前期至中期,研究区降水量较少,土壤水分含量较小,且浅层土壤含水率较高,生长季中期,研究区降水量增加,土壤水分含量增加,且中、深层土壤含水率较高,刺槐根系对浅层土壤水的吸收利用率

减少了 13.85%,对中层和深层土壤水的吸收利用率分别增加了 4.55%和 9.33%;丝绵木根系对浅层土壤水的吸收利用率增加了 15.02%,对中、深层土壤水的吸收利用率分别减少了 3.8%和 11.2%(表 5)。生长季中期至后期,土壤水分含量达到最大,浅层土壤含水率较高,刺槐对浅层土壤水的利用率增加了 8.24%,对中、深层土壤水的吸收利用率分别减少了 0.13%和 8.06%;丝绵木根系对浅层土壤水的吸收利用率减少了 4.81%,对中、深层土壤水的吸收利用率分别增加了 3.98%和 0.82%(表 5)。刺槐和丝绵木在生长季不同时期的根系吸水来源不同,这是植物适应研究区水分环境变化的体现,是两种植物与该地区环境协同进化的反映^[33],由刺槐的根系分布可知,刺槐能够吸收整个土壤剖面的水分,所以在生长季的不同月份,刺槐根据土壤水分含量大小来改变自身的吸水层位。丝绵木浅层根系较少,根系主要分布于中层,但丝绵木吸水层位的变化与土壤水分含量变化正好相反,这可能与混交林种植方式下两树种对有限水分的利用方式和自身的生存策略有关^[34],在旱区植被-水系统中,植物具有重新分配不同深度根系吸水功能的能力,进而可选择性吸收利用不同的水源供植物生长需要^[35]。

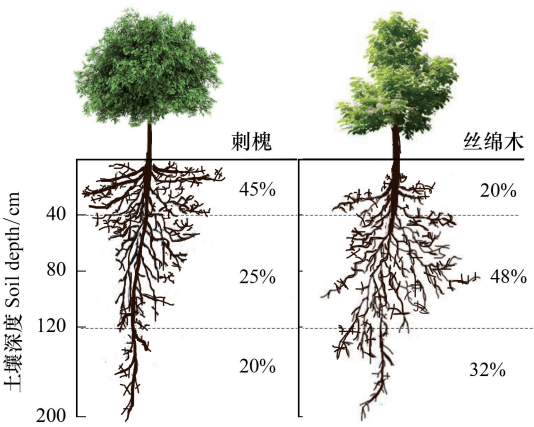


图 7 刺槐和丝绵木的根系分布剖面示意图
Fig.7 Schematic diagram of root distribution profile of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus*

图中的百分比代表植物根系在每一土层的分布比例

表 5 土壤质量含水量、土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和根系吸水比例在不同土层深度的分布

Table5 Distribution of gravimetric soil water content, soil water $\delta^{18}\text{O}$ and root water absorption ratio in different soil depths

土层深度 Soil depth/cm	土壤质量含水量 Gravimetric soil water content/%	土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ Soil water $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	根系吸水比例 Root water uptake rate/%	
			<i>Rp</i>	<i>Eb</i>
0—40	3.84—9.29	-7.08—-0.71	23.65—39.9	22.48—39.75
40—120	4.64—8.87	-8.47—-5.83	32.85—41.18	35.11—41.81
120—200	2.01—6.95	-7.65—-6.09	24.60—35.48	23.40—35.71

在人工林生态系统中,同一时期吸水层位相同的植物间存在对水资源的竞争现象^[35],本研究中,刺槐和丝绵木在生长季后期的吸水层位一致,均主要利用中层土壤水,利用率分别为 38.72%和 39.89%。两树种在相同生境条件下对同一资源的利用状况和种间关系可以通过生态位重叠指标来揭示^[36],树种间生态位重叠存在两种可能:一是树种间共享资源的同时存在竞争关系;二是树种间资源利用的同时存在生态位分离关系,这种生态位分离包括时间和空间上的差异^[37]。本研究选取 *PS* 指数作为表征植物间生态位重叠的指标,计算结果表明,生长季后期 *PS* 指数显著大于生长季前期和中期,因此,生长季后期刺槐和丝绵木存在对水资源的竞争现象,在生长季前期和中期,当刺槐主要吸收利用浅层土壤水时,丝绵木主要吸收利用中层土壤水,当刺槐主要吸收利用中层土壤水时,丝绵木主要吸收利用浅层土壤水,刺槐和丝绵木通过水分利用空间上的差异应对干旱环境。综上所述,刺槐和丝绵木混交模式下,两树种所采取的生存策略保证了其水分利用在时间和空间上的协调分配,两树种能够通过水分利用的互补来应对干旱胁迫。

3.3 植物根系对土壤水分的再分配作用

在植物生长过程中,根系从土壤中不断的吸收水分,并通过蒸腾作用将水分散失到大气中^[38]。沙土孔隙度大,渗透性强,表层土壤水分容易蒸发,土壤含水量整体较小。在干旱沙区,植物生长所需水分除降水下渗之后由土壤水供给之外,植物只能通过自身的水分再分配作用来维持生存^[39]。当蒸腾作用减弱时,植物根系将中、深层土壤水分吸收运输至表层土壤,改善表层的土壤水分状况,补充供给自身的蒸腾耗水,并且可以增

强相邻植物抵抗干旱的能力^[40],反之,根系将浅层土壤水分吸收运输至中深层,改善中深层土壤水分状况^[41]。本研究发现生长季前2个月刺槐和丝绵木的蒸腾耗水量随着土壤湿度的降低而减少,但这种结果的出现也不能排除叶龄和水分利用效率等其他因素导致旱季蒸腾作用的减少^[42],这与 Eller 等^[43]的研究结果相似,研究发现旱季土壤含水量的降低会使巴西热带云林的蒸腾耗水减少。并且本研究发现,降水量越少,蒸腾耗水量越低,刺槐吸收利用浅层土壤水,而丝绵木吸收利用中、深层土壤水,表层土壤质量含水量较高;降水量越多,蒸腾耗水量越高,刺槐吸收利用中、深层土壤水,而丝绵木吸收利用浅层土壤水,表层土壤质量含水量较小,中深层土壤质量含水量较大,这与 Wu 等^[44]研究黄土高原地区苹果经济林与刺槐林的结果相似,刺槐根系活力较差,对水分的依赖性强,耐旱性较差^[45]。丝绵木细根主要分布于中层土壤,根系密度大,导水率高,根系水势-17.11 bar,其根系可能有水分再分配作用^[46—48]。本研究发现,在整个生长季,研究区浅层土壤质量含水量(6.53%)>中层土壤质量含水量(6.49%)>深层土壤质量含水量(4.88%),并且在生长季初期(5—6月),气候干旱条件下,浅层土壤含水量的增加更为明显,因此,浅层土壤水分含量增加可能与植物根系的水分再分配作用有关,研究区浅层土壤养分含量高于中、深层,水分再分配作用可以活化土壤表层的营养元素,使得气候干旱条件下浅层土壤水分可以作为土壤浅层根系分布较多的植物蒸腾所需水分的主要来源,促进有利的生物地球化学条件,增强表层细根活动和植物的养分吸收作用^[49]。因此,本研究发现的浅层土壤水分的增加可能反映了干旱沙区森林生态系统中植物根系对土壤水分再分配作用下植物在水分和养分需求之间的平衡,但需要更多的研究来证实这一假设。

4 结论

刺槐和丝绵木的蒸腾耗水量在生长季中期最高,前期和后期较小,刺槐的蒸腾耗水量是丝绵木的1.55倍。影响刺槐蒸腾耗水的主要环境因子为饱和水汽压差、太阳辐射、0—40 cm 土壤质量含水量和40—120 cm 土壤质量含水量;影响丝绵木蒸腾耗水的主要环境因子为饱和水汽压差、太阳辐射、平均气温、0—40 cm 土壤质量含水量和40—120 cm 土壤质量含水量。在生长季前期,刺槐主要吸收利用浅层土壤水来维持自身的蒸腾耗水,丝绵木主要吸收利用中层土壤水来维持自身的蒸腾耗水。生长季中期,刺槐主要吸收利用中层土壤水来维持自身的蒸腾耗水,丝绵木主要吸收利用浅层土壤水来维持自身的蒸腾耗水。生长季后期,刺槐和丝绵木主要吸收利用中层土壤水来维持自身的蒸腾耗水。在土壤水分含量较小的月份,刺槐和丝绵木主要通过水分利用空间上的差异来应对干旱,维持自身的蒸腾耗水,而在土壤水分含量较高的情况下,刺槐和丝绵木的相似性比例指数最大,存在较强的水分竞争关系。在生长季前期和中期,刺槐和丝绵木的水分利用策略可能影响了研究区土壤水的再分配,改善了研究区的土壤水分条件,浅层土壤水分较高可能反映了土壤水分再分配作用下植物对水分和养分获取需求之间的平衡。

参考文献(References):

- [1] 韩磊,韩永贵,黄晓宇,高阳,孙兆军. 氢氧稳定同位素示踪旱区植物水分来源与利用策略. 安徽农业大学学报, 2020, 47(3): 435-441.
- [2] 刘树宝,陈亚宁,陈亚鹏,李洋,任志国. 黑河下游荒漠河岸林不同林龄胡杨对脉冲式降雨的响应. 干旱区研究, 2016, 33(1): 172-178.
- [3] 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.
- [4] 汪海娇,田丽慧,张登山,王俏雨. 青海湖东沙地不同植被恢复措施下土壤水分变化特征. 干旱区研究, 2021, 38(1): 76-86.
- [5] 郭孟霞,毕华兴,刘鑫,李俊,郭超颖,林靛靛. 树木蒸腾耗水研究进展. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 114-120.
- [6] 贾天宇,刘廷玺,段利民,张亦然,童新,包永志. 半干旱沙丘草甸过渡带人工杨树蒸腾耗水规律. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3255-3264.
- [7] Grossiord C, Gessler A, Granier A, Pollastrini M, Bussotti F, Bonal D. Interspecific competition influences the response of oak transpiration to increasing drought stress in a mixed Mediterranean forest. Forest Ecology and Management, 2014, 318: 54-61.
- [8] Holwerda F, Bruijnzeel L A, Muñoz-Villiers L E, Equihua M, Asbjornsen H. Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. Journal of Hydrology, 2010, 384(1/2): 84-96.

- [9] 何春霞, 张劲松, 孟平, 胡心雨, 高峻. 太行山南麓 3 种常见灌木的水分利用特性. 林业科学, 2018, 54(9): 137-146.
- [10] Wallace J, McJannet D. Processes controlling transpiration in the rainforests of north Queensland, Australia. Journal of Hydrology, 2010, 384(1/2): 107-117.
- [11] Gotsch S G, Ashbjornsen H, Holwerda F, Goldsmith G R, Weintraub A E, Dawson T E. Foggy days and dry nights determine crown-level water balance in a seasonal tropical montane cloud forest. Plant, Cell and Environment, 2014, 37(1): 261-272.
- [12] Harris P P, Huntingford C, Cox P M, Gash J H C, Malhi Y. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122(3/4): 215-227.
- [13] Geris J, Tetzlaff D, McDonnell J, Anderson J, Paton G, Soulsby C. Ecohydrological separation in wet, low energy northern environments? A preliminary assessment using different soil water extraction techniques. Hydrological Processes, 2015, 29(25): 5139-5152.
- [14] Jackson P C, Cavelier J, Goldstein G, Meinzer F C, Holbrook N M. Partitioning of water resources among plants of a lowland tropical forest. Oecologia, 1995, 101(2): 197-203.
- [15] Schwendenmann L, Pendall E, Sanchez-Bragado R, Kunert N, Hölscher D. Tree water uptake in a tropical plantation varying in tree diversity: interspecific differences, seasonal shifts and complementarity. Ecohydrology, 2015, 8(1): 1-12.
- [16] Muñoz-Villiers L E, Holwerda F, Alvarado-Barrientos M S, Geissert D R, Dawson T E. Reduced dry season transpiration is coupled with shallow soil water use in tropical montane forest trees. Oecologia, 2018, 188(1): 303-317.
- [17] Wu Z, Behzad H M, He Q F, Wu C, Bai Y, Jiang Y J. Seasonal transpiration dynamics of evergreen *Ligustrum lucidum* linked with water source and water-use strategy in a limestone Karst area, southwest China. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126199.
- [18] 宋超, 余琦殷, 王瑞霞, 王萍, 王俊, 马瑞, 崔国发. 基于植被覆盖度的宁夏灵武白芨滩自然保护区防风固沙功能时空变化研究. 生态学报, 2021, 41(8): 3131-3143.
- [19] 高媛, 周星辰, 孙牧笛, 吕苗苗, 顾沛雯. 宁夏白芨滩国家级自然保护区苦豆子内生真菌多样性及生态分布. 草地学报, 2016, 24(6): 1309-1317.
- [20] 隋明演, 张瑛, 徐庆, 高德强, 王婷, 汪思龙. 水汽来源和环境因子对湖南会同大气降水氢氧同位素组成的影响. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1791-1799.
- [21] 苏鹏燕, 张明军, 王圣杰, 邱雪, 王家鑫, 杜勤勤, 郭蓉, 车存伟. 基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河岸植物水分来源. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1835-1843.
- [22] 杨艳林, 靖晶, 赵永波, 何军, 杜小锋. 基于氢氧稳定同位素的武汉北部新城地表水-地下水转换关系研究. 中国地质, 2022, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210419.1413.012.html>.
- [23] Bush S E, Hultine K R, Sperry J S, Ehleringer J R. Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring- and diffuse-porous trees. Tree Physiology, 2010, 30(12): 1545-1554.
- [24] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 杜阿朋. 雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林的蒸腾耗水规律. 生态学报, 2019, 39(6): 2147-2155.
- [25] 马昌坤. 黄土高原人工刺槐林地生态水文过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [26] Li Y Z, Yu W J, Wang K W, Ma X Y. Comparison of the aridity index and its drivers in eight climatic regions in China in recent years and in future projections. International Journal of Climatology, 2019, 39(14): 5256-5272.
- [27] 王玉阳, 陈亚鹏, 李卫红, 王日照, 周莹莹, 张建鹏. 塔里木河下游典型荒漠河岸植物水分来源. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1150-1157.
- [28] Cavanaugh M L, Kure S A, Scott R L. Evapotranspiration partitioning in semiarid shrubland ecosystems: a two-site evaluation of soil moisture control on transpiration. Ecohydrology, 2011, 4(5): 671-681.
- [29] Biederman J A, Scott R L, Arnone III J A, Jasoni R L, Litvak M E, Moreo M T, Papuga S A, Ponce-Campos G E, Schreiner-McGraw A P, Vivoni E R. Shrubland carbon sink depends upon winter water availability in the warm deserts of North America. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 407-419.
- [30] 莫康乐, 陈立欣, 周洁, 方显瑞, 康满春, 张志强. 永定河沿河沙地杨树人工林蒸腾耗水特征及其环境响应. 生态学报, 2014, 34(20): 5812-5822.
- [31] Zheng C L, Wang Q. Water-use response to climate factors at whole tree and branch scale for a dominant desert species in central Asia: *Haloxylon ammodendron*. Ecohydrology, 2014, 7(1): 56-63.
- [32] 杜梦鸽, 王善举, 樊军, 葛红元. 祁连山青海云杉低液流特征及其影响因素. 应用生态学报, 2022, DOI: 10.13287/j.1001-9332.202204.021.
- [33] 郝帅, 李发东. 艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究. 地理学报, 2021, 76(7): 1649-1661.
- [34] 黄健强, 邓永红, 曾小平, 孟泽, 张倩媚, 李跃林. 南亚热带针阔叶混交林生态系统水分利用效率. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2538-2545.
- [35] 曾巧, 马剑英. 黑河流域不同生境植物水分来源及环境指示意义. 冰川冻土, 2013, 35(1): 148-155.

- [36] 聂莹莹, 陈金强, 辛晓平, 徐丽君, 杨桂霞, 王旭. 呼伦贝尔草甸草原区主要植物种群生态位特征与物种多样性对封育年限响应. 草业学报, 2021, 30(10): 15-25.
- [37] 肖艳梅, 解婧媛, 姚义鹏, 梁士楚, 高丽娜, 张惠, 莫适祯. 桂林岩溶石山常绿落叶阔叶混交林乔木层优势物种生态位研究. 生态学报, 2021, 41(20): 8159-8170.
- [38] 刘美珍, 孙建新, 蒋高明, 董鸣. 植物-土壤系统中水分再分配作用研究进展. 生态学报, 2006, 26(5): 1550-1557.
- [39] 袁国富, 张佩, 薛沙沙, 庄伟. 沙丘多枝怪柳灌丛根层土壤含水量变化特征与根系水力提升证据. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1033-1042.
- [40] Hultine K R, Williams D G, Burgess S S O, Keefer T O. Contrasting patterns of hydraulic redistribution in three desert phreatophytes. *Oecologia*, 2003, 135(2): 167-175.
- [41] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 张小由, 赵春彦. 植物根系水力再分配测定与模拟方法研究进展与展望. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2930-2936.
- [42] Reich P B, Borchert R. Changes with leaf age in stomatal function and water status of several tropical tree species. *Biotropica*, 1988, 20(1): 60-69.
- [43] Eller C B, Burgess S S O, Oliveira R S. Environmental controls in the water use patterns of a tropical cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae). *Tree Physiology*, 2015, 35(4): 387-399.
- [44] Wu W J, Li H J, Feng H, Si B C, Chen G J, Meng T F, Li Y, Siddique K H M. Precipitation dominates the transpiration of both the economic forest (*Malus pumila*) and ecological forest (*Robinia pseudoacacia*) on the Loess Plateau after about 15 years of water depletion in deep soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: 108244.
- [45] 王凯, 赵成姣, 邓杰, 张莹, 高爽. 成年侧柏和刺槐对春季干旱的适应策略. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3176-3181.
- [46] 卞义宁, 孙尚海. 白杜. 中国水土保持, 1996(4): 47-48.
- [47] 文华, 刘钰华, 朱玉伟, 孙万忠, 刘康, 卓拉木, 古丽娜. 丝棉木抗旱耐盐性能的研究. 干旱区研究, 1996, 13(4): 67-72.
- [48] 张俊朴. 丝棉木根系与栽培试验初报. 中国园林, 1993, 9(1): 56-57.
- [49] Merlin M, Perot T, Perret S, Korboulewsky N, Vallet P. Effects of stand composition and tree size on resistance and resilience to drought in sessile oak and Scots pine. *Forest Ecology and Management*, 2015, 339: 22-33.