

DOI: 10.5846/stxb202204221107

刘雨, 高光耀, 王棣, 焦磊, 李宗善, 田立德, 傅伯杰. 不同疏伐强度下黄土丘陵区刺槐林的水分利用特征. 生态学报, 2023, 43(7): 2845-2855.

Liu Y, Gao G Y, Wang D, Jiao L, Li Z S, Tian L D, Fu B J. Water use characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantations under different thinning intensities in the loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2845-2855.

不同疏伐强度下黄土丘陵区刺槐林的水分利用特征

刘雨¹, 高光耀^{2,4,*}, 王棣², 焦磊^{3,4}, 李宗善^{2,4}, 田立德¹, 傅伯杰^{2,4}

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

2 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

4 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061

摘要:造林是生态恢复的重要措施,但由于种植密度过高,导致土壤干燥化,林木生长衰退,严重制约其生态功能的提升。疏伐是人工林改造的重要手段,水分利用特征是确定适宜疏伐密度的关键因素,但目前缺少疏伐对人工林水分利用特征影响的系统研究。基于此,以黄土丘陵区刺槐林为研究对象,设置疏伐 55% (P1)、28% (P2)、16% (P3) 和对照 (P4) 四个处理,通过 0—500 cm 深度的土壤水与茎秆水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 、叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的采样分析并利用 MixSIAR 模型,比较了不同疏伐强度下刺槐林水分来源和水分利用效率的差异,建立了水分来源比例与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的定量关系。结果表明:(1)疏伐样地不同深度的土壤含水量均高于对照样地,表明疏伐对缓解土壤水分胁迫具有重要作用。(2)随着疏伐强度的增大,浅、中层(0—100 cm、100—300 cm)土壤水对刺槐的贡献比例呈增加趋势(P1:80.4%;P2:78.1%;P3:76.3%;P4:67.8%),而深层土壤水分(300—500 cm)的贡献比例相对降低,表明疏伐促进了刺槐对浅层及中层土壤水的吸收利用,减少了对深层土壤水的过度消耗。(3)疏伐样地的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均大于对照样地,表明疏伐提高了刺槐的水分利用效率,且刺槐叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与浅层土壤水分贡献比例呈线性正相关($P<0.01$),而与中深层土壤水贡献比例呈线性负相关($P<0.05$)。研究结果初步反映了疏伐对刺槐林水分利用特征的影响,可为黄土高原刺槐林改造和功能提升提供科学依据,未来需开展疏伐后长时间序列的观测研究。

关键词:刺槐;疏伐;水分利用;稳定同位素;黄土高原

Water use characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantations under different thinning intensities in the loess hilly region

LIU Yu¹, GAO Guangyao^{2,4,*}, WANG Di², JIAO Lei^{3,4}, LI Zongshan^{2,4}, TIAN Lide¹, FU Bojie^{2,4}

1 Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

4 National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China

Abstract: Afforestation is an important measure for ecological restoration. Due to the high planting density, the soil becomes dry, the growth of trees declines, and the improvement of ecological function is restricted seriously. Thinning is an important means of the artificial forest reconstruction, and water use characteristic is the key factor to determine suitable thinning density. However, there is few systematic studies about the effects of thinning on water use characteristics. This study set up four treatments including thinning 55% (P1), 28% (P2), 16% (P3) and control (P4) for *Robinia*

基金项目:国家自然科学基金项目(41991233, 41822103);中国科学院青年创新促进会(Y202013)

收稿日期:2022-04-22; **网络出版日期:**2022-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gygao@rcees.ac.cn

pseudoacacia plantation in the loess hilly region. The $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in soil water and stem water at 0—500 cm depth and leaf $\delta^{13}\text{C}$ value were measured. The differences of water source and water use efficiency of *R. pseudoacacia* among different thinning intensities were compared. The quantitative relationships between water source ratio and $\delta^{13}\text{C}$ were established. The results showed that the soil water content of the thinned plots at different depths was higher than that of the control plot, which indicated that thinning played an important role in alleviating soil water stress. The contribution proportion of soil water in shallow (0—100 cm) and middle layers (100—300 cm) to *R. pseudoacacia* increased with the thinning intensity (P1: 80.4%; P2: 78.1%; P3: 76.3%; P4: 67.8%), and the contribution proportion of soil water in deep layer (300—500 cm) decreased relatively. The leaf $\delta^{13}\text{C}$ of the thinned plots was higher than that of the control plot, which indicated that thinning improved water use efficiency of *R. pseudoacacia*. There was a positive linear correlation between $\delta^{13}\text{C}$ value of *R. pseudoacacia* and the contribution proportion of soil water in shallow layer ($P < 0.01$), while a negative linear correlation was found between $\delta^{13}\text{C}$ value and the contribution proportion of soil water in the middle and deep layers ($P < 0.05$). These findings gave a preliminary understanding about the effects of thinning on the water use characteristics of *R. pseudoacacia* plantation, and provided the scientific basis for the reconstruction of artificial *R. pseudoacacia* plantations and the improvement of ecological function in the Loess Plateau. It is necessary to carry out long-term observation after thinning in the future.

Key Words: *Robinia pseudoacacia*; thinning; water use; stable isotope; the Loess Plateau

黄土高原地区降水量少且降雨入渗深度较浅,同时大部分地区地下水位较深,植物无法获取,土壤水是植物生长的唯一水源^[1-2]。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为重要的生态恢复物种,自20世纪50年代以来在黄土高原广泛种植,成为黄土高原面积最大的人工林^[3]。黄土高原刺槐面积有23.1万公顷,占全国的20%^[4]。林分密度关系到树木生长和能否合理、有效地利用土壤水^[5]。由于现存人工刺槐林密度过高,极易造成土壤干化和林木生长衰退,需通过疏伐促进林分结构优化、改善生长状况并调控土壤水^[6]。疏伐通过降低密度来改变森林结构^[7],进而影响水分循环过程(如降雨截留、穿透雨、蒸散发、土壤水分和土壤入渗等)^[8-10]、植物生长(胸径、茎径、树高、生产力)^[11-12]及林下植被多样性^[13]等。土壤水分有效性变化会影响植物水分利用特征(包括水分来源和水分利用效率等)^[14]。植物水分利用特征是干旱半干旱地区植被适应环境的重要表征,同时也是植被生态建设中需要重点考虑的关键问题^[15]。因此,量化不同疏伐措施下刺槐的水分利用特征有助于理解刺槐对环境变化的响应机制,同时为黄土高原地区人工刺槐林改造提供科学依据。

疏伐对环境条件(如水和光)的改变影响树木水分利用和碳同化^[16]。目前,稳定同位素技术是研究植物水分利用特征的有力工具,常用的稳定同位素为 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ ^[15]。除少数盐生植物和湿地植物外,绝大多数陆地植物在吸收水分过程中不发生同位素分馏^[17],因此,可以通过植物茎秆水和水源的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 信息确定植物的水分来源及各水源所占比例^[18]。植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 可以反映水分利用效率(Intrinsic water use efficiency, WUE_i)^[19],而 WUE_i 可综合反映碳同化与水分消耗之间的生理特征^[20]。目前疏伐影响植物水分利用特征的研究主要集中在同位素值变化和 WUE_i ,只有少数研究结合稳定同位素技术分析疏伐对植物水分来源的影响^[21-23]。Fernandes等^[24]利用树干液流法和稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$)分析疏伐对人工松林 $\delta^{18}\text{O}$ 值及 WUE_i 的影响,发现疏伐导致 $\delta^{18}\text{O}$ 和 WUE_i 的提高。Niccoli等^[25]运用 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 分析疏伐对栓皮栎生产力和水分利用效率(WUE_i)的影响,发现疏伐对树木生长和 WUE_i 有积极影响。Kerhoulas等^[26]利用 $\delta^2\text{H}$ 发现低密度林分增加了黄松获取重要水源(冬季降水补给的深层土壤水)的机会。Wang等^[27]利用 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析间伐和林下植被去除对马尾松水分来源的影响,结果表明轻度疏伐(去除15%的树木基底面积)是较为合理的森林管理措施。在黄土高原地区,以往研究主要分析了植物物种、树龄、恢复年限及共存植物对人工林水分利用特征的影响^[2,15],其中Wang等^[2]运用 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 三种同位素对不同林龄刺槐水分利用特征进行分析,研究指出较老的人工林通过增加水分利用效率而不是转换水源来响应水源的增加。整体来看,关于黄土

高原地区人工林水分利用特征的研究没有考虑疏伐的影响,缺少疏伐对人工林水分利用特征影响的系统研究。

因此,本研究基于稳定同位素技术,在黄土丘陵区人工刺槐林地设置重度、中度、轻度疏伐样地和对照样地,探讨不同疏伐强度下人工刺槐林水分来源、水分利用效率的差异,分析水分来源与水分利用效率的关系,为黄土丘陵区人工刺槐林改造和功能提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区与样地设置

本研究试验点为地处典型黄土丘陵沟壑区的陕西省延安市宝塔区南泥湾林场(36°20′54″N, 109°36′42″E),多年平均温度和降雨量为 10℃ 和 537 mm^[6]。研究区属于半干旱温带大陆性气候,80%的降雨主要集中在 5—9 月^[15]。在同一坡度、坡向均一坡面(南北>300 米、东西>60 米)上选择刺槐林样地,退耕前为坡耕地,于 2002 年退耕造林,刺槐林龄为 20 年(2022 年),平均密度为 1408 株/hm²。平行设置 4 个 50 m×50 m 的刺槐林标准样地,样地间距约为 15 m,于 2019 年 7 月实施疏伐,依次为重度(P1)、中度(P2)、轻度(P3)疏伐样地和对照样地(P4),具体疏伐信息见表 1。

表 1 刺槐林样地林分密度与疏伐强度

Table 1 Stand density and thinning intensity of *R. pseudoacacia* plots

| 样地 Plots | 重度 Heavy(P1) | 中度 Moderate(P2) | 轻度 Light(P3) | 对照 Control(P4) |
|--|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 保留密度 Density after thinning/(株/hm ²) | 680 | 736 | 916 | 1408 |
| 地上生物量 Above ground biomass/(kg/hm ²) | 5.04×10 ³ | 9.48×10 ³ | 10.11×10 ³ | 11.92×10 ³ |
| 疏伐强度(基于地上生物量) Thinning intensity(based on above ground biomass)/% | 55 | 28 | 16 | 0 |

1.2 样品采集

在 2020 年 6—10 月,采集不同疏伐强度刺槐样地的土壤、茎秆和叶片样品,采样时间为 6 月 10 日、6 月 24 日、7 月 7 日、7 月 23 日、8 月 10 日、8 月 19 日、9 月 5 日、9 月 16 日和 10 月 6 日,共 9 次。土壤采样深度为 500 cm,0—100 cm 深度按 10 cm 间隔采样,100 cm 以下按 20 cm 间隔采样。每层土壤采集三份,两份分别保存在玻璃瓶中,设置 2 个重复,用于测量土壤水氢氧同位素,另一份装在铝盒中,在烘箱中于 105℃ 下烘 24 h 测量土壤含水量。采集刺槐茎秆时需去掉外部韧皮部,于正午时间取足够的茎秆样品放入玻璃瓶中,每个样地每次采集样品均设置 3 个重复,用于测量茎秆水氢氧同位素。野外采集的土壤样品和刺槐茎秆样品全部密封在冰箱(-20℃)中保存,以便后续的水分提取,以及进行下一步的同位素分析工作。采集足够的叶片样品,在烘箱中于 65℃ 下烘 48 h,研磨后过 100 目筛,用于测量叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 。

1.3 实验分析

土壤水和植物茎秆水抽提装置为 LI-2100 全自动真空冷凝抽提装置(LI-2100, LICA, Beijing, China),土壤水抽提温度设置为 195℃(植物茎秆水抽提温度设置为 150℃),抽提时间为 3 h,抽提效率为 98%。土壤水同位素分析仪为 LGR 水同位素分析仪(DLT-100, Los Gatos Research, Mountain View, USA), $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 测试精度分别为 $\pm 1.2\text{‰}$ 、 $\pm 0.3\text{‰}$ 。植物茎秆水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值采用稳定同位素质谱仪(MAT253, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany), $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 测试精度分别为 $\pm 1\text{‰}$ 、 $\pm 0.2\text{‰}$ 。稳定同位素值表示为^[15]:

$$\delta X = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中: X 代表 ^2H 、 ^{18}O 和 ^{13}C , R_{sample} 为 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。 R_{standard} 为 V-SMOW 和 V-PDB,其中 ^2H 和 ^{18}O 的 R_{standard} 是 V-SMOW, ^{13}C 的 R_{standard} 是 V-PDB。

1.4 数据分析

将 9 次采样数据按照月尺度进行合并,进行数据处理、分析及绘制图表。根据剖面上土壤水氢氧同位素

值的变化情况及其变异程度,将 0—500 cm 土层划分为浅层(0—100 cm)、中层(100—300 cm)和深层(300—500 cm)。利用 MixSIAR 模型(R4.0.5 软件)分析各层土壤水对刺槐水分来源的贡献比例,将刺槐茎秆水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值作为 mixture data 输入,不同层次土壤水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均值及标准差作为 source data 输入,模型中 discrimination data 设置为 0, MCMC 模拟长度设置为“long”,在 0.05 水平上检验其显著性。利用 SPSS 23.0 中单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同疏伐强度样地之间土壤水分、土壤水和茎秆水氢氧同位素、叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与各层土壤水贡献比例的差异性进行分析。采用 Pearson 相关分析探讨 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤水贡献比例之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同疏伐强度刺槐样地的土壤水分变化特征

如图 1 所示,不同疏伐强度样地的土壤含水量在 5%—25% 之间,土壤含水量均表现为随土层的加深而逐渐降低,浅层土壤水分变异性($CV=26\%$)高于中层和深层($CV=12\%$)。在 0—500 cm 土层深度内,疏伐样地土壤含水量(9.35%—15.25%)整体高于对照样地(9.16%—14.64%),但不同疏伐强度样地土壤含水量在各深度间变化规律不一致,浅层土壤含水量表现为 $P2>P1>P3$,而在中层为 $P1>P3>P2$, $P3$ 的深层土壤含水量最高。此外,三个疏伐样地土壤含水量在不同采样时间有显著差异($P<0.05$),对照样地土壤含水量在不同采样时间没有显著差异($P>0.05$)。

2.2 不同疏伐强度刺槐样地的土壤水和茎秆水同位素变化特征

如图 2 和图 3 所示,浅层土壤水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为富集且变异程度较大(CV 分别为 19% 和 25%),主要是浅层受到蒸发和降水的共同作用,而中层和深层变异程度较小(中层分别为 10% 和 18%,深层为 9% 和 16%)。疏伐样地浅层土壤水同位素均值高于对照样地。 $P1$ 样地的浅层、中层土壤水同位素值最高,且浅层土壤水同位素值显著高于 $P4$ 样地($P<0.05$),中层土壤水同位素值显著高于 $P3$ 样地($P<0.05$),深层土壤水的同位素值在各样地间不存在显著性差异($P>0.05$)。

植物茎秆水同位素值随疏伐强度和采样时间变化(图 4)。刺槐茎秆水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 7 月整体呈下降趋势,在 9 月开始升高。不同疏伐强度下刺槐茎秆水同位素值在不同采样时间具有显著性差异($P<0.05$),表明刺槐的水分来源具有明显的时间变异性。 $P4$ 样地刺槐茎秆水同位素值最为富集, $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均值分别为 -65.02‰ 和 -7.53‰ 。 $P1$ 样地刺槐茎秆水同位素值最贫化, $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均值分别为 -69.38‰ 和 -7.88‰ 。

如图 5 所示,四个样地的土壤蒸发线(SWL)的斜率与截距均小于全球大气降水线(GMWL; $y=8x+10$)^[28] 和当地大气降水线(LMWL; $y=7.76x+5.14$)^[29]。浅层、中层和深层土壤水同位素值几乎分布在 LMWL 右侧且分布在一条直线上,表明土壤水来自降水,且受到蒸发作用而发生富集。 $P3$ 样地土壤蒸发线的斜率和截距均高于 $P4$ 样地,而 $P1$ 和 $P2$ 样地土壤蒸发线的斜率和截距均低于对照样地,表明 $P3$ 样地受到的蒸发占蒸散发的比率较小,而 $P1$ 、 $P2$ 样地蒸发占蒸散发的比率较大。不同疏伐强度下刺槐茎秆水的同位素值均分布在土壤蒸发线附近,说明刺槐主要利用不同深度的土壤水。

2.3 不同疏伐强度下刺槐的水分来源

MixSIAR 模型分析结果表明,不同疏伐强度下刺槐在生长季前期(7 月前)主要利用浅层土壤水(69.3% 以上);在中期(7—9 月)刺槐对中层及深层土壤水的利用增加;在后期(9 月后),疏伐样地对中层土壤水的利用程度高于深层,对照样地则主要利用深层土壤水(图 6)。不同疏伐强度下刺槐对浅层土壤水的平均吸收比例分别为 52.0%($P1$)、56.6%($P2$)、52.8%($P3$) 和 49.7%($P4$),对中层土壤水的吸收比例分别为 28.4%($P1$)、21.5%($P2$)、23.5%($P3$) 和 18.1%($P4$),对深层土壤水的吸收比例分别为 19.6%($P1$)、22.0%($P2$)、23.7%($P3$) 和 32.3%($P4$)。不同疏伐强度下刺槐主要利用浅层土壤水,三个疏伐样地刺槐浅层土壤水吸收比例显著高于中、深层土壤水($P<0.05$),对照样地浅层土壤水贡献比例显著高于中层土壤水($P<0.05$)。三个疏伐样地浅、中层土壤水对刺槐的贡献比例均高于对照样地,深层土壤水贡献比例则小于对照样地,但各样地之间并没

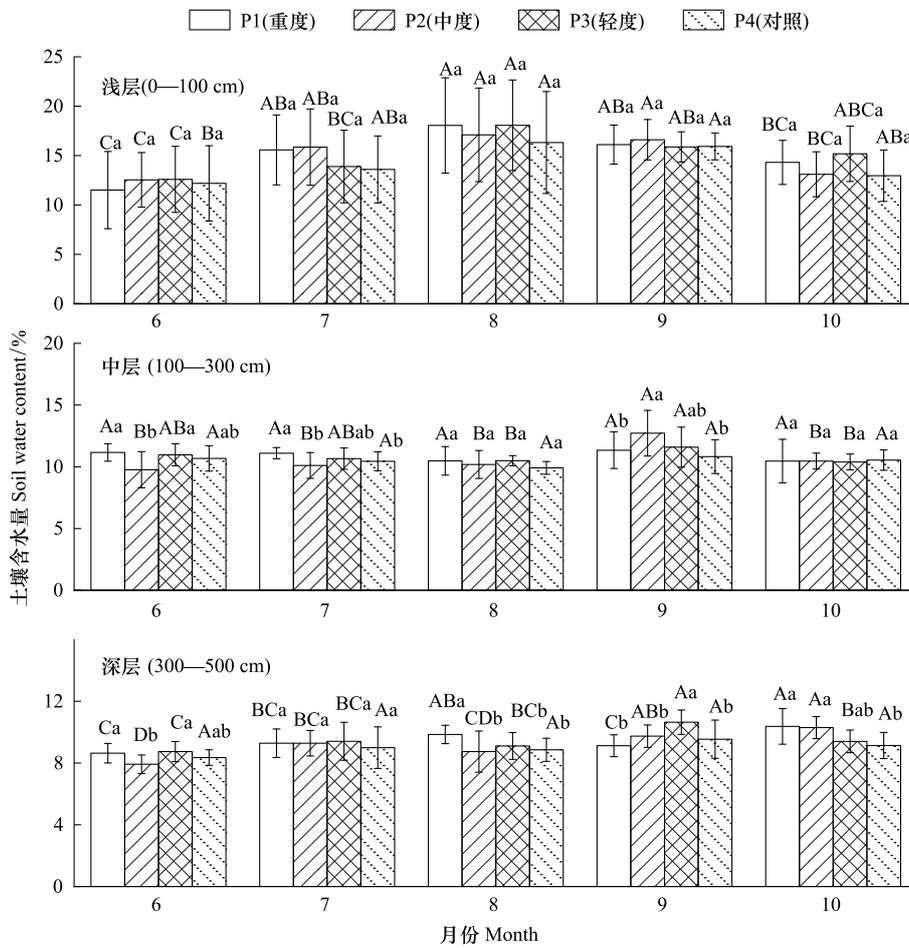


图 1 不同疏伐强度刺槐样地浅层、中层和深层土壤含水量的动态变化

Fig.1 Soil water content in shallow, middle and deep layers of *R. pseudoacacia* plots with different thinning intensities

不同大写字母表示同一样地不同月份间土壤含水量差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一月份不同样地间土壤含水量差异显著 ($P < 0.05$)

有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.4 不同疏伐强度下刺槐叶片 $\delta^{13}C$ 的变化特征

如图 7 所示, 随着生长季的进行, 刺槐叶片 $\delta^{13}C$ 值整体呈现降低的趋势, 三个疏伐样地刺槐叶片 $\delta^{13}C$ 值在不同采样时间具有显著差异 ($P < 0.05$), 对照样地刺槐叶片 $\delta^{13}C$ 在不同采样时间没有显著差异 ($P > 0.05$) (图 7)。不同疏伐强度下刺槐 $\delta^{13}C$ 平均值表现为 $P1 (-26.43\text{‰}) > P3 (-26.48\text{‰}) > P2 (-26.97\text{‰}) > P4 (-27.22\text{‰})$, 各样地 $\delta^{13}C$ 之间不存在显著性差异 ($P > 0.05$)。Pearson 相关分析表明, $\delta^{13}C$ 与浅层土壤水贡献比例之间存在显著正相关关系 ($R = 0.53, P < 0.01$), 与中层、深层土壤水贡献比例之间存在显著负相关关系 ($R = -0.47, P < 0.01$ 及 $R = -0.42, P < 0.05$) (图 8)。

3 讨论

3.1 不同疏伐强度下刺槐水分来源的差异

本研究表明, 各疏伐样地刺槐主要利用浅中层 (0—300 cm) 土壤水, 分别为 80.4% (P1)、78.1% (P2)、76.3% (P3) 和 67.8% (P4)。随着疏伐强度的增大, 刺槐对浅中层土壤水的利用增加, 对深层土壤水的利用减少。植物根系一般先从浅层土壤获取水资源, 因为能量成本较低, 而且上层 (0—200 cm) 的土壤水资源和养分利用率较高^[30]。对照样地 (P4) 林分密度最高, 高密度林分截留量大, 植物无法获取上层水源, 同时, 密度

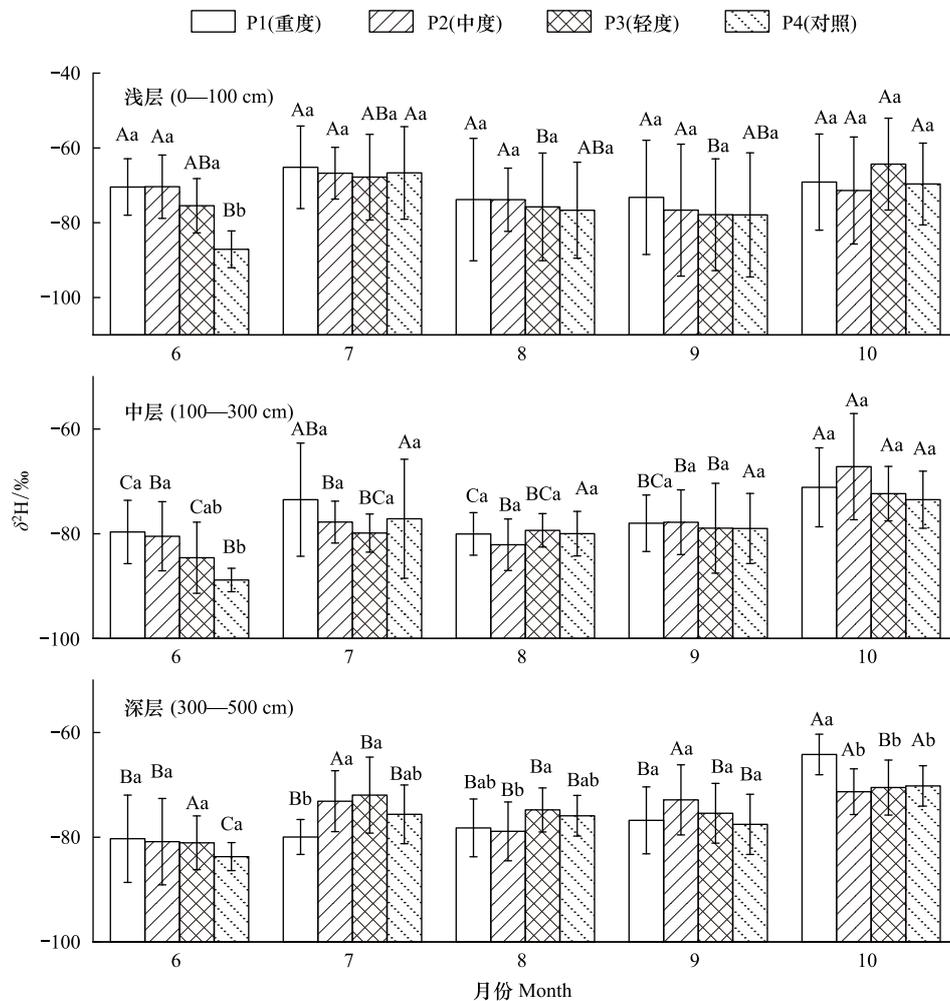


图2 不同疏伐强度刺槐样地浅层、中层和深层土壤水 $\delta^2\text{H}$ 的动态变化

Fig.2 $\delta^2\text{H}$ values of shallow, middle and deep soil water in *R. pseudoacacia* plots with different thinning intensities

较高的林分资源竞争更强,促使刺槐对深层土壤水的利用增加^[25]。三个疏伐样地浅中层土壤含水量高于对照样地,浅中层土壤水贡献比例也高于对照样地。树木疏伐后,由于提取土壤水分的树木减少,树木水分胁迫减轻,通过增加到达土壤表面的降水量(如穿透雨),可用水量进一步增加,刺槐对上层土壤水的利用会有所增加^[10,31]。重度疏伐(P1)样地刺槐对浅层土壤水的吸收比例比P2和P3样地低,对中层土壤水的利用在四个样地中最高。P2样地浅层土壤水含量最高,具有最高的浅层土壤水吸收比例。P1样地中层土壤水含量高于其他样地,且与P4样地间具有显著性差异($P < 0.05$)。重度疏伐虽然会增加剩余树木的生长速率,但林冠疏开也会促进林下植被增加,耗水量增大。许多研究表明,灌木及草本一般根系较浅,对上层土壤水利用较多,当林下植被增多后,对浅层土壤水的利用增加,与刺槐形成竞争机制,会促使刺槐吸水发生竞争位移,即对中深层土壤水利用增加^[32-33]。同时,也有研究发现重度疏伐增加光穿透性,土壤蒸发作用加强^[9]。

3.2 不同疏伐强度下刺槐水分利用效率的差异

研究表明,植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以反映植物的长期水分利用效率,且两者之间存在正相关关系,即 $\delta^{13}\text{C}$ 值越高,植物水分利用效率越高。在叶片尺度上,内在水分利用效率被定义为叶片光合速率与气孔导度的比值^[19]。林分密度不同,林分内部光、水和养分的可用性不同,气象因素(如温度、光照、降水和大气 CO_2 等)可以通过影响光合作用期间的气孔导度影响植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[19],进而影响水分利用效率。林分密度的减少导致剩余树木叶片养分浓度的增加以及冠层光截获增加^[34],同时由于根系之间竞争及雨水截留的减少,供水

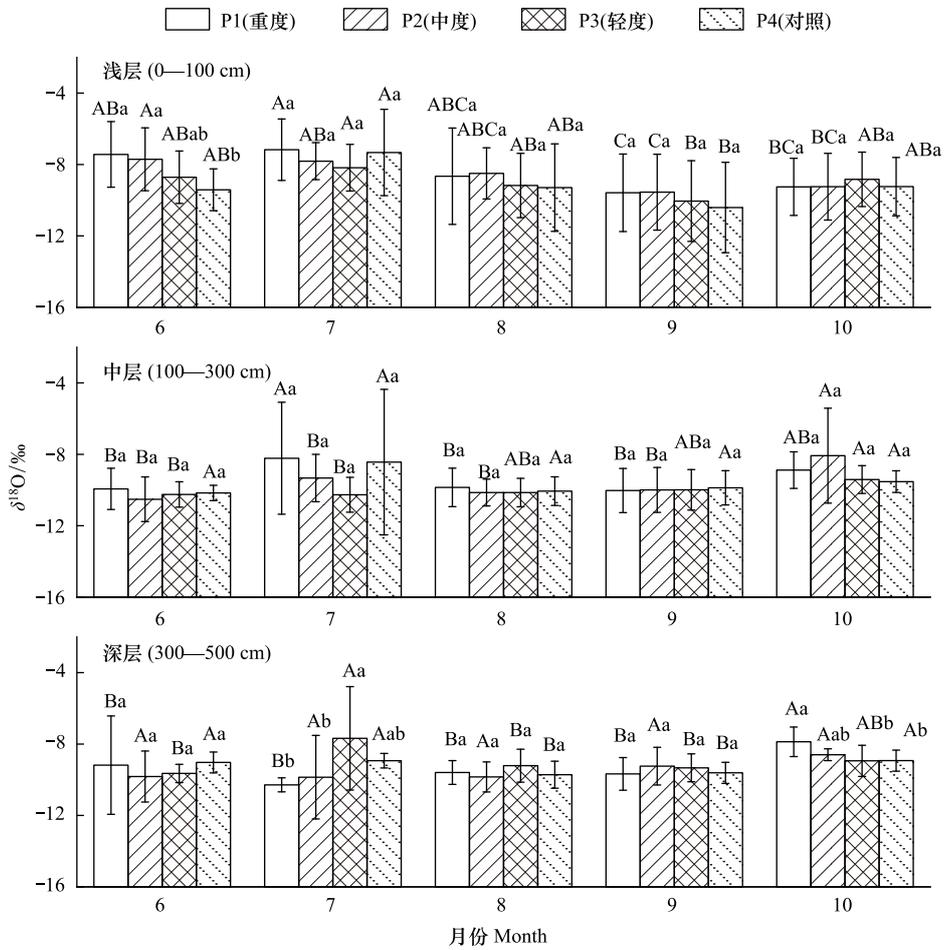


图 3 不同疏伐强度刺槐样地浅层、中层和深层土壤水 $\delta^{18}O$ 的动态变化

Fig.3 $\delta^{18}O$ values of shallow, middle and deep soil water in *R. pseudoacacia* plots with different thinning intensities

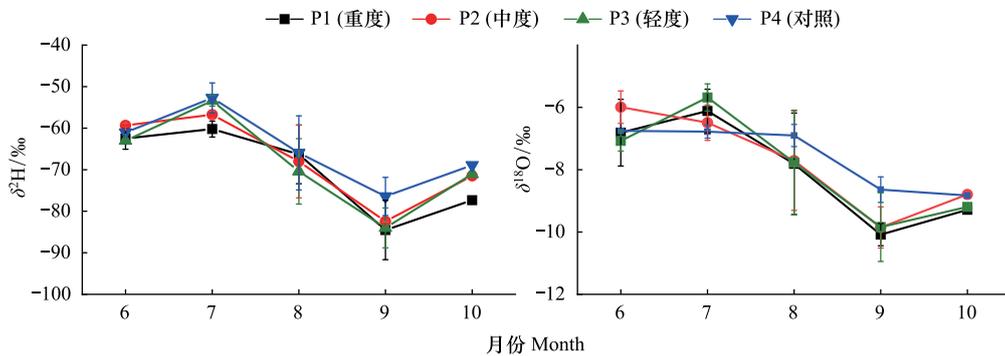


图 4 不同疏伐强度刺槐样地茎秆水 δ^2H 与 $\delta^{18}O$ 的动态变化

Fig.4 δ^2H and $\delta^{18}O$ values of stem water in *R. pseudoacacia* plots with different thinning intensities

量大幅增加,这些条件可能对剩余树木的光合能力有积极影响^[25]。疏伐后,水分竞争的减少以及水分胁迫的减轻,气孔导度增加,从而加强树木蒸腾作用^[24]。本研究中,疏伐样地 $\delta^{13}C$ 均值高于对照样地,表明疏伐后刺槐叶片光合速率的提高要大于蒸腾速率的提高。研究表明,疏伐能够促进植物生长以及生产力的提高^[24]。由于疏伐后光合速率的变化,植物通过高生长速率抵消水分利用^[24],从而促进水分利用效率的提高。同时,

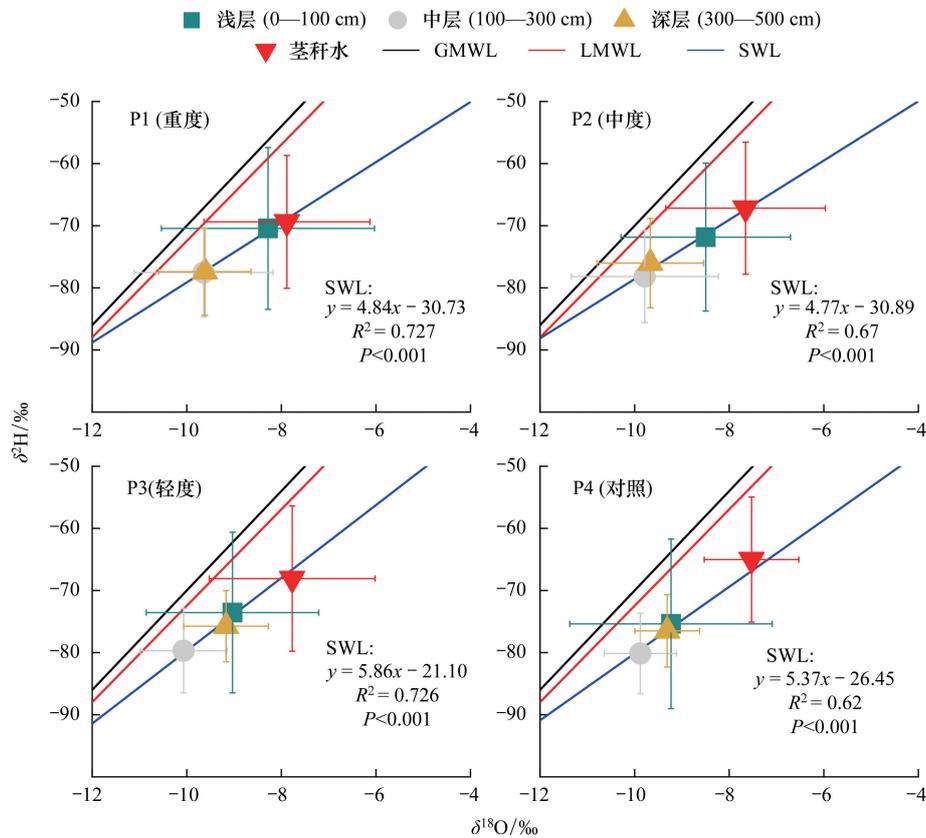


图5 不同疏伐强度刺槐样地土壤水和茎秆水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的相关关系

Fig.5 Correlation between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of soil water and stem water in *R. pseudoacacia* plots with different thinning intensities

GMWL: 全球大气降水线 Global atmospheric precipitation line ($y = 8x + 10$)^[28]; LMWL: 当地大气降水线 Local atmospheric precipitation line ($y = 7.76x + 5.14$, $R^2 = 0.91$, $P < 0.01$)^[29]; SWL: 土壤蒸发线 Soil water evaporation line

较高的 WUE_i 意味着单位重量的水可以产生较多的干物质,有利于植物在干旱环境中生存^[20],表明疏伐提高了刺槐的耐旱性。此外,各样地刺槐叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间不存在显著差异,这可能是疏伐时间较短的原因,未来需要开展长时间序列的观测研究。

3.3 刺槐水分来源与水分利用效率的关系

植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与浅层土壤水贡献比例呈显著正相关关系,而与中深层土壤水贡献比例呈显著负相关关系。在整个生长季中, $\delta^{13}\text{C}$ 也随着生长季的进行呈现降低的趋势,刺槐在生长季前期对浅层土壤水的利用较高,而在生长季中后期对中深层土壤水的利用有所增加,说明刺槐在水分利用方面具有较大的生态可塑性。这种水分利用模式在其他物种有类似的结果,如王剑^[15] 研究发现随着生长季的进行,荆条对深层土壤水的利用逐渐增加,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐减小,这可能是随着生长季的进行,蒸腾作用加强。Wang 等^[27] 通过间伐处理发现轻度间伐后的马尾松在小降雨事件后持续利用深层土壤水,而在大降雨事件中则利用更多的浅层土壤水。Wang 等^[2] 研究发现 30 年生刺槐在比较湿的年份 WUE_i 较高,可能是由于在植物长期消耗大量土壤水分的情况下,当土壤水分得到突然的补充,会刺激植物叶片水平上 WUE_i 的增加。在降水较为充足的条件下,刺槐具有较高的叶片水 WUE_i ,对浅层土壤水的吸收增加,说明刺槐在水分利用方面的机会主义吸水策略^[2],而在水分亏缺的条件下,刺槐通过深根系获取中深层土壤水应对水分胁迫。

研究结果初步反映了不同疏伐强度下刺槐水分利用特征的变化,可以为黄土高原人工刺槐林的改造及功能提升提供科学依据,同时,对半干旱生态系统植物生态适应性及林业实践具有重要意义。未来将在此基础上进行长时间序列的观测研究。

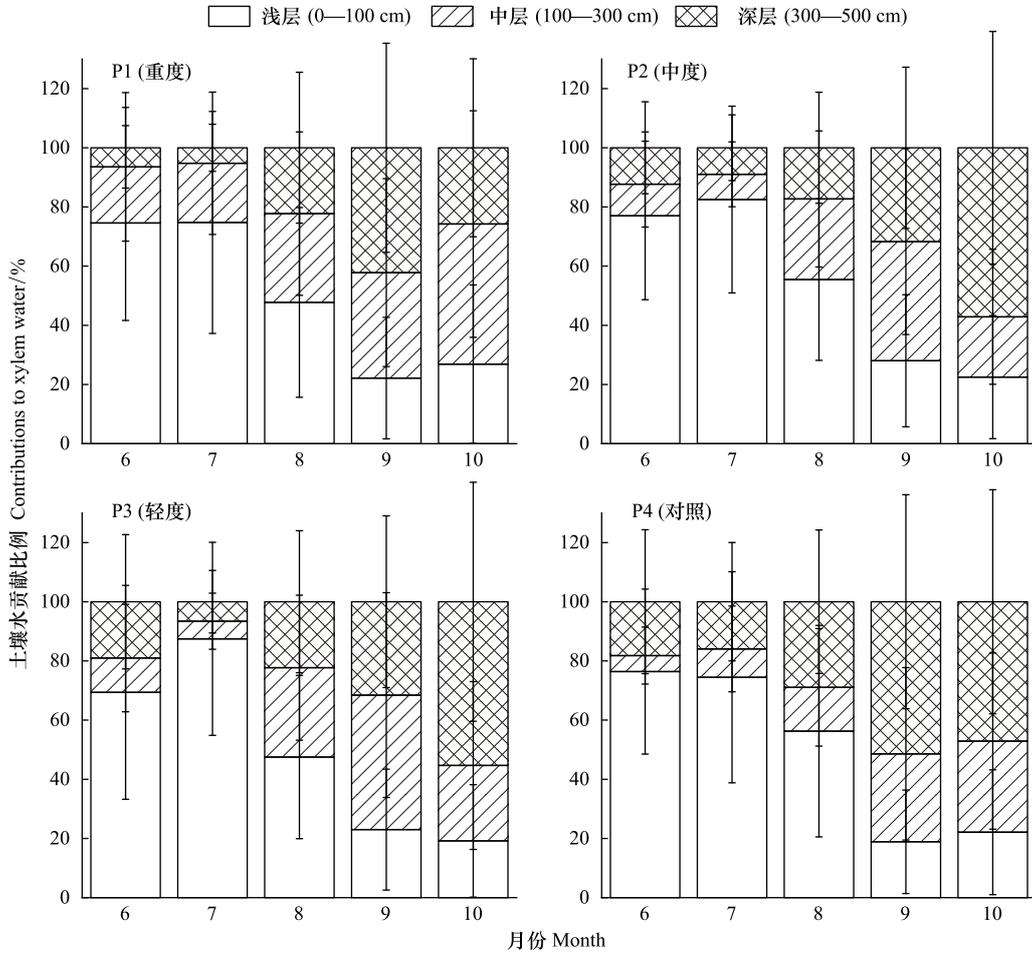


图 6 不同疏伐强度下刺槐水分来源的动态变化

Fig.6 Temporal variations of water source of *R. pseudoacacia* under different thinning intensities

4 结论

本研究利用 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 及 MixSIAR 模型,通过设置重度(P1)、中度(P2)、轻度疏伐(P3)和对照样地(P4),分析不同疏伐强度下人工刺槐林水分来源和水分利用效率的差异,量化各层土壤水对不同疏伐强度刺槐的贡献比例。主要结论如下:

(1) 疏伐对缓解土壤水分胁迫具有重要作用。与对照样地相比,疏伐样地不同深度的土壤含水量均更高。

(2) 疏伐促进了刺槐对浅层及中层土壤水的吸收,减少对深层土壤水的过度消耗。刺槐在生长季前期主要利用浅层土壤水,生长季中期对中深层土壤水的利用有所增加,在后期疏伐样地对中层土壤水的利用高于深层,而对照样地则主要利用深层土壤水。

(3) 疏伐改变了刺槐叶片水平上的水分利用效率。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 表明,疏伐样地水分利用效率均高于对照样地,有利于刺槐在干旱环境中生存。 $\delta^{13}\text{C}$ 与浅层土壤水贡献比例呈显著正相关关系,与中层土壤水贡献比例、

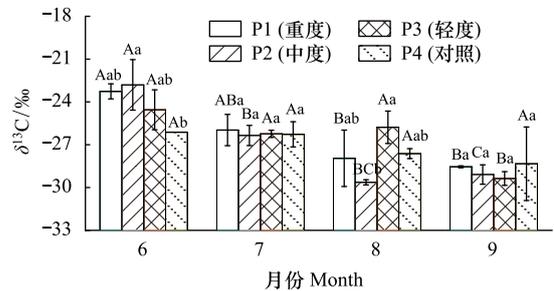


图 7 不同疏伐强度下刺槐叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的动态变化

Fig.7 $\delta^{13}\text{C}$ values of *R. pseudoacacia* leaves under different thinning intensities

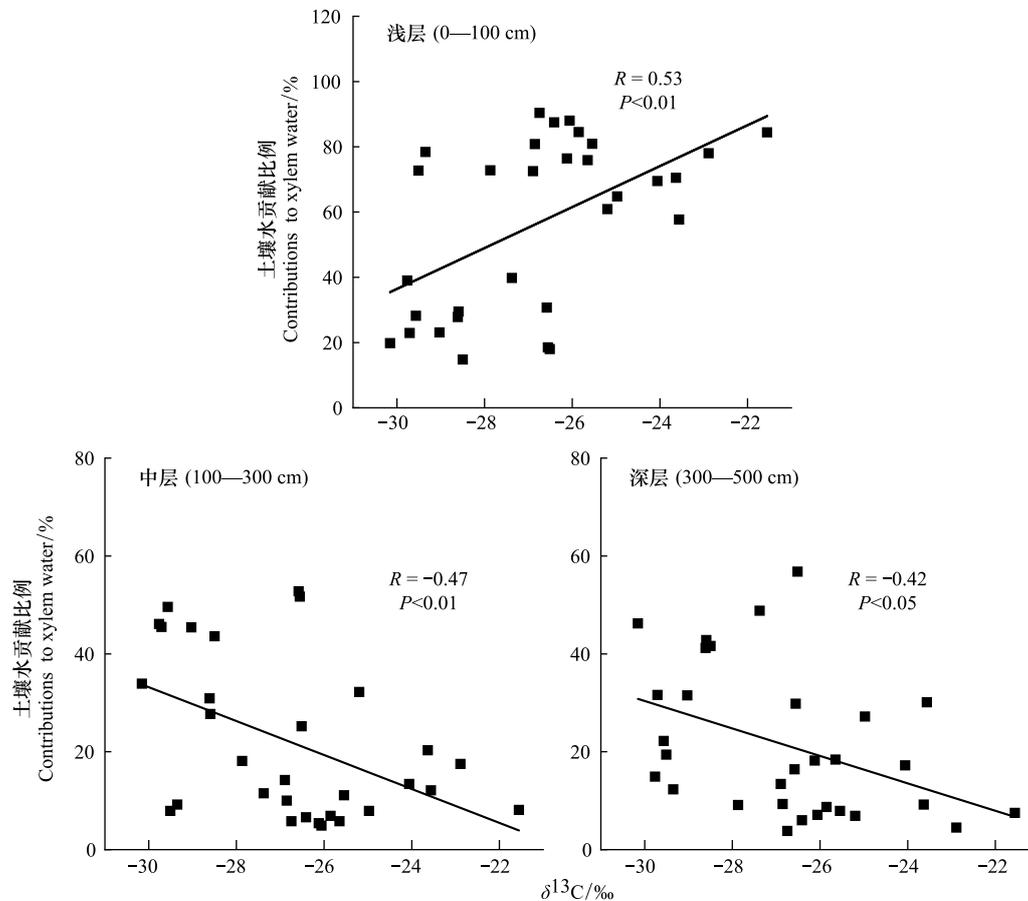


图8 刺槐叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与浅层、中层和深层土壤水贡献比例之间的关系

Fig.8 Relationships between $\delta^{13}\text{C}$ and soil water contribution of shallow, middle and deep layers to *R. pseudoacacia*

深层土壤水贡献比例呈显著负相关关系。

参考文献 (References):

- [1] Guo Z S, Zhang W W. Impact of initial planting density on soil water resource use limit by plants. *Geoinformatics & Geostatistics: an Overview*, 2016, 4(1): 1000137.
- [2] Wang J, Fu B J, Jiao L, Lu N, Li J Y, Chen W L, Wang L X. Age-related water use characteristics of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 301/302: 108344.
- [3] 吴多洋, 焦菊英, 于卫洁, 徐海燕, 陈一先. 陕北刺槐林木生长及林下植被与土壤水分对种植密度的响应特征. *西北植物学报*, 2017, 37(2): 346-355.
- [4] 王春煦. 蜜源信息预报. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [5] 鲁子瑜, 关秀琦, 韩蕊莲, 马志仁, 刘克俭, 郭鹏. 半干旱黄土丘陵区造林密度试验研究. *中国水土保持*, 1993(7): 26-29, 37.
- [6] 杨文慧, 焦磊, 买尔当·克依木, 李宗善, 高光耀, 王聪, 白应飞, 孙婧雅, 温润泉. 疏伐对黄土丘陵区刺槐林蒸腾的影响. *生态学报*, 2021, 41(12): 4923-4934.
- [7] Giuggiola A, Ogée J, Rigling A, Gessler A, Bugmann H, Treyde K. Improvement of water and light availability after thinning at a xeric site: which matters more? A dual isotope approach. *New Phytologist*, 2016, 210(1): 108-121.
- [8] Sun X C, Onda Y, Kato H, Gomi T, Komatsu H. Effect of strip thinning on rainfall interception in a Japanese cypress plantation. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 607-618.
- [9] Xu L H, Cao G X, Wang Y N, Hao J, Wang Y H, Yu P T, Liu Z B, Xiong W, Wang X. Components of stand water balance of a larch plantation after thinning during the extremely wet and dry years in the Loess Plateau, China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01307.
- [10] Molina A J, del Campo A D. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: a contribution towards hydrology-oriented silviculture

- in Aleppo pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 2012, 269: 206-213.
- [11] Zhang S Y, Chauret G, Swift D E, Duchesne I. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(4): 945-952.
- [12] Meadows J S, Goetz J C G. Fifth-year response to thinning in a water oak plantation in north Louisiana. *Southern Journal of Applied Forestry*, 2001, 25(1): 31-39.
- [13] 黄丹, 彭志, 韩玉洁. 抚育间伐对上海水源涵养林林分生长及其林下植物多样性的影响. *亚热带植物科学*, 2017, 46(3): 263-266.
- [14] Wu W J, Tao Z, Chen G J, Meng T F, Li Y, Feng H, Si B C, Manevski K, Andersen M N, Siddique K H M. Phenology determines water use strategies of three economic tree species in the semi-arid Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 312: 108716.
- [15] 王剑. 基于稳定同位素技术的黄土丘陵区典型植物水分利用来源研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [16] Qiu S, Bell R W, Hobbs R J, McComb A J. Overstorey and juvenile response to thinning and drought in a jarrah (*Eucalyptus marginata* Donn ex Sm.) forest of southwestern Australia. *Plant and Soil*, 2013, 365(1/2): 291-305.
- [17] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 1991, 350(6316): 335-337.
- [18] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, Templer P H, Tu K P. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 507-559.
- [19] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40: 503-537.
- [20] 赵丹, 程军回, 刘耘华, 刘利利, 李瑞霞, 盛建东. 荒漠植物梭梭稳定碳同位素组成与环境因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(8): 2743-2752.
- [21] Sohn J A, Saha S, Bauhus J. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: a meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2016, 380: 261-273.
- [22] Park J, Kim T, Moon M, Cho S, Ryu D, Kim H S. Effects of thinning intensities on tree water use, growth, and resultant water use efficiency of 50-year-old *Pinus koraiensis* forest over four years. *Forest Ecology and Management*, 2018, 408: 121-128.
- [23] Manrique-Alba À, Beguería S, Molina A J, González-Sanchis M, Tomàs-Burguera M, del Campo A D, Colangelo M, Camarero J J. Long-term thinning effects on tree growth, drought response and water use efficiency at two Aleppo pine plantations in Spain. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138536.
- [24] Fernandes T J G, del Campo A D, Herrera R, Molina A J. Simultaneous assessment, through sap flow and stable isotopes, of water use efficiency (WUE) in thinned pines shows improvement in growth, tree-climate sensitivity and WUE, but not in WUEi. *Forest Ecology and Management*, 2016, 361: 298-308.
- [25] Niccoli F, Pelleri F, Manetti M C, Sansone D, Battipaglia G. Effects of thinning intensity on productivity and water use efficiency of *Quercus robur* L. *Forest Ecology and Management*, 2020, 473: 118282.
- [26] Kerhoulas L P, Kolb T E, Koch G W. Tree size, stand density, and the source of water used across seasons by ponderosa pine in northern Arizona. *Forest Ecology and Management*, 2013, 289: 425-433.
- [27] Wang T, Xu Q, Zhang B B, Gao D Q, Zhang Y, Ren R R, Jiang J. Effects of understory removal and thinning on water uptake patterns in *Pinus massoniana* Lamb. plantations: evidence from stable isotope analysis. *Forest Ecology and Management*, 2022, 503: 119755.
- [28] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [29] Wang J, Fu B J, Lu N, Zhang L. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau. *The Science of the Total Environment*, 2017, 609: 27-37.
- [30] Schenk H J. Soil depth, plant rooting strategies and species' niches. *The New Phytologist*, 2008, 178(2): 223-225.
- [31] Medhurst J L, Battaglia M, Beadle C L. Measured and predicted changes in tree and stand water use following high-intensity thinning of an 8-year-old *Eucalyptus nitens* plantation. *Tree Physiology*, 2002, 22(11): 775-784.
- [32] 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.
- [33] Hardanto A, Röhl A, Hendrayanto, Hölscher D. Tree soil water uptake and transpiration in mono-cultural and jungle rubber stands of Sumatra. *Forest Ecology and Management*, 2017, 397: 67-77.
- [34] Warren C R, McGrath J F, Adams M A. Water availability and carbon isotope discrimination in conifers. *Oecologia*, 2001, 127(4): 476-486.