

DOI: 10.5846/stxb202005271360

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.

Yang W H, Jiao L, Maierdang Keyimu, Li Z S, Gao G Y, Wang C, Bai Y F, Sun J Y, Wen R Q. Effect of thinning on transpiration of *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4923–4934.

## 疏伐对黄土丘陵区刺槐林蒸腾的影响

杨文慧<sup>1</sup>, 焦磊<sup>1,\*</sup>, 买尔当·克依木<sup>2</sup>, 李宗善<sup>2</sup>, 高光耀<sup>2</sup>, 王聪<sup>2</sup>, 白应飞<sup>3</sup>, 孙婧雅<sup>3</sup>, 温润泉<sup>4</sup>

1 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

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 延安市退耕还林工程管理办公室, 延安 716000

4 延安市宝塔区南泥湾国有生态林场, 延安 716000

**摘要:** 黄土高原地区植被建设已达到土壤水分承载力的阈值, 需要对现有林分进行结构优化并提升其生态功能。不合理的林分密度是导致黄土丘陵区刺槐林土壤干化、生长衰退的主要原因之一。疏伐可以优化林分结构, 并能够通过控制蒸腾耗水来调控土壤水分, 是促进刺槐林可持续生长的有效手段。疏伐对黄土丘陵区刺槐林蒸腾有何影响, 目前并不清楚。研究基于树干液流法估算了 4 个不同疏伐强度(样地 1: 52%、样地 2: 48%、样地 3: 35%、样地 4: 未疏伐) 下刺槐单株尺度的液流速率与林分尺度的日平均蒸腾量, 并分析了不同时间尺度下液流速率与环境因子的关系, 以阐明疏伐对黄土丘陵区刺槐林蒸腾的影响。结果表明: (1) 单株尺度刺槐蒸腾速率(即液流速率) 随疏伐强度减小(林分密度增大) 呈现下降趋势(样地 1:  $0.53 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、样地 2:  $0.41 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、样地 3:  $0.31 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、样地 4:  $0.33 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ); (2) 观测期林分尺度日平均蒸腾量随疏伐强度减小呈现上升趋势(样地 1:  $0.90 \text{ mm/d}$ 、样地 2:  $1.18 \text{ mm/d}$ 、样地 3:  $1.04 \text{ mm/d}$ 、样地 4:  $1.44 \text{ mm/d}$ ); (3) 在半小时尺度与日尺度上, 各样地液流速率与环境因子的关系没有显著差异, 半小时尺度单株液流速率均与太阳辐射相关性最高(相关系数  $0.883\text{--}0.908$ )。液流速率日变化过程与环境因子日变化过程存在时滞现象; 日尺度单株液流速率与饱和水汽压亏缺相关性最高(相关系数  $0.843\text{--}0.913$ )。样地间日尺度单株液流速率的差异性随着饱和水汽压亏缺增大而增大。研究结果初步反映了疏伐导致的林分密度变化对刺槐蒸腾的影响, 将为黄土丘陵区刺槐林的结构改造、功能提升和土壤水分调控提供理论支持。

**关键词:** 疏伐; 刺槐; 液流速率; 林分密度; 黄土丘陵沟壑区

## Effect of thinning on transpiration of *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess hilly region

YANG Wenhui<sup>1</sup>, JIAO Lei<sup>1,\*</sup>, MAIERDANG Keyimu<sup>2</sup>, LI Zongshan<sup>2</sup>, GAO Guangyao<sup>2</sup>, WANG Cong<sup>2</sup>, BAI Yingfei<sup>3</sup>, SUN Jingya<sup>3</sup>, WEN Runquan<sup>4</sup>

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

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

3 Grain to Green Project Management Office of Yan'an Government, Yan'an 716000, China

4 Nanniwan State-owned Ecological Forestry Station of Baota District, Yan'an 716000, China

**Abstract:** Vegetation reconstruction in the Loess Plateau has reached the threshold of soil water carrying capacity, and it is

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701021), 国家重点研发计划项目(2017YFC0504701); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2019JQ-767, 2020JQ-415)

收稿日期: 2020-05-27; 修订日期: 2020-12-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljiao@snnu.edu.cn

necessary to optimize the structure of existing forest stands and improve their ecological functions. Inappropriate stand density is one of the main reasons for soil desiccation and growth decline of *Robinia pseudoacacia* plantations in loess hilly region. Thinning can optimize the stand structure and regulate soil water by controlling transpiration, which is an effective way to promote the sustainable growth of *R. pseudoacacia* plantations. However, the effect of thinning on the transpiration of *R. pseudoacacia* at both tree and stand scales in the loess hilly region is not clear presently. Based on the sap flow technique, this study estimated the single tree scale sap flow density and stand scale transpiration in four plots with different thinning intensities (P1: 52%, P2: 48%, P3: 35%, P4: no thinning), and analyzed the relationship between the sap flow and environmental factors at different time scales. We aim to reveal the impact of thinning on the transpiration of *R. pseudoacacia* plantations in the loess hilly region. The results are as follows: (1) the single tree scale transpiration (i.e. sap flux density) (P1:  $0.53 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , P2:  $0.41 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , P3:  $0.31 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , P4:  $0.33 \text{ kg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) decreased with the decreasing thinning intensity (the increase of stand density), and the temporal variation of sap flux density of the four plots were similar both in half-hour scale and in daily scale. (2) The stand scale transpiration (P1: 0.90 mm/d, P2: 1.18 mm/d, P3: 1.04 mm/d, P4: 1.44 mm/d) increased with the decreasing thinning intensity during the observation period. (3) There was no significant difference in correlation between the sap flux density and environmental factor among four plots in half-hour and day scale. Solar radiation was the most significant environmental factor (correlation coefficient 0.883—0.908) which controlled tree scale half-hour sap flux densities, and there was a time lag between the diel variation of flux density and environmental factors. Meanwhile, vapor pressure deficit was the most significant environmental factor (correlation coefficient 0.843—0.913), which determined single tree scale daily sap flux densities, and the difference of daily sap flux density among plots significantly increased with increasing vapor pressure deficit. The results of this study preliminarily reflect the effect of thinning on the transpiration of *R. pseudoacacia*, which will provide scientific support for the stand structure optimization, functional improvement and soil water regulation of *R. pseudoacacia* plantations in loess hilly region.

**Key Words:** thinning; *Robinia pseudoacacia*; sap flow; stand density; loess hilly region

黄土高原是我国典型的生态脆弱区,水资源短缺、水土流失严重<sup>[1]</sup>。为控制水土流失,从1999年起实施了“退耕还林(草)”工程,开展了大规模的植被建设<sup>[2-3]</sup>。刺槐因其速生、耐旱、易繁殖等特点被用作黄土高原地区主要的水土保持树种和造林树种<sup>[4]</sup>,其林分面积占黄土丘陵沟壑区乔木林面积的80%以上<sup>[5]</sup>,在增加区域植被覆盖率、减缓水土流失、改善区域生态系统服务等方面发挥了重要作用<sup>[6-8]</sup>。在植被建设早期,由于人们片面追求快速郁闭而忽略了适地适树和近自然森林经营理论技术,导致刺槐林林分密度过高。林分密度是影响林木生长、林分生产力及水分利用的关键因子,直接关系到造林成效的优劣<sup>[6]</sup>。在黄土高原,土壤水分是植物的重要水源<sup>[2]</sup>,植物根系从土壤中吸收的水分,通过叶片气孔扩散到大气中<sup>[9]</sup>,较高的造林密度导致刺槐林在蒸腾过程中过多地消耗土壤水分,是造成土壤干层的主要原因之一,而土壤干层的普遍存在,又使土壤供水能力大幅下降,继而影响了刺槐的正常生长,出现大面积生长减缓、冠层干枯甚至整株死亡的现象,不利于其生态功能的持续发挥<sup>[10-11]</sup>。

当前,黄土高原植被建设已达到土壤水分承载力的阈值<sup>[12]</sup>,未来不宜继续开展大规模的植树造林,而是要加强对现有林分的结构优化并提升其生态功能<sup>[13]</sup>。对高密度的刺槐林进行合理的疏伐,既可以优化林分结构,还能够控制蒸散发并调控土壤水分,是促进刺槐林可持续生长的有效手段<sup>[1]</sup>。蒸腾是植被重要的生理过程,也是关键的水文过程,精确量化树木蒸腾是造林密度、物种选择等林业生态工程建设技术中的最关键问题之一<sup>[14]</sup>。目前对于刺槐林蒸腾的研究主要集中于耗水规律及其环境因子<sup>[15-22]</sup>,缺乏疏伐对其蒸腾影响的研究。为了探明疏伐对人工刺槐林蒸腾耗水的影响,本研究在黄土丘陵区建立刺槐林长期固定观测样地,并对样地进行不同强度的疏伐,以阐明刺槐(单株、林地尺度)蒸腾随疏伐强度的变化规律,并揭示在不同时间

尺度上不同疏伐强度刺槐林蒸腾与环境关系的差异,旨在为刺槐林疏伐效果的评价、合理林分密度的确定、林分结构优化和功能提升提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域与样地设置

研究区位于陕西省延安市宝塔区南泥湾国有生态林场(36°20′54″N,109°36′42″E)(图1),平均海拔1200 m。该区域属半湿润气候区,是我国东部季风湿润区与内陆干旱区过渡带<sup>[23]</sup>,多年(1960—2016年)的平均温度与降雨量为10℃和537 mm<sup>[24]</sup>,年内降水分布不均,多集中在6—9月<sup>[25]</sup>。研究区属黄土高原丘陵沟壑区,土壤主要为黄绵土。本研究的观测样地位于南泥湾林场附近中国科学院生态环境研究中心“黄土高原延安市人工刺槐林生态效益评估固定监测样地”内。

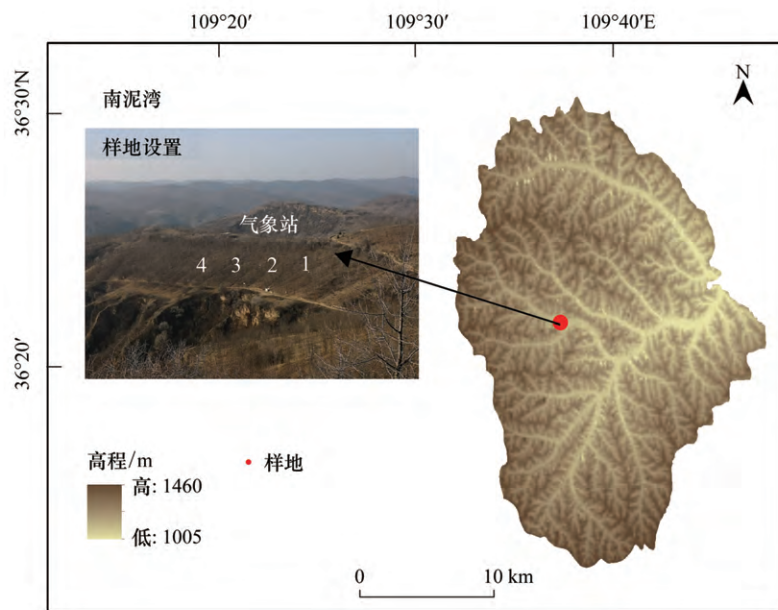


图1 研究区域位置及样地设置

Fig.1 Location of study site and sampling site setting

### 1.2 疏伐措施

试验林位于坡向、坡度相同的坡面上,坡向为东南,坡度15°左右,坡面南北长度大于300 m,东西宽大于60 m。试验林为“退耕还林(草)”工程实施后种植,根据树木年轮生长锥测定的林龄为18年(2019年),平均密度为1408株/hm<sup>2</sup>,种植之前为坡耕地。在刺槐试验林平行设置4个50 m×50 m的标准样地,间隔15 m左右(图1),各样地初始密度相似。2019年7月,根据不同疏伐强度设计方案对3个样地进行疏伐,优先砍伐生长不良的刺槐,兼顾保留植株空间分布均匀。疏伐强度最大的为样地1(P1),疏伐强度为52%,疏伐后林分密度为680株/hm<sup>2</sup>;其次为样地2(P2),其疏伐强度48%,疏伐后密度为736株/hm<sup>2</sup>;再为样地3(P3),其疏伐强度为35%,疏伐后密度为916株/hm<sup>2</sup>,样地4是未疏伐的对照样地(图2)。

### 1.3 树干液流观测

在4个样地中部(对角线相交的中间位置),各选择不同径阶、生长良好的刺槐8株,采用Granier式的热扩散探针(Thermal Dissipation Probe, TDP)对单株树木的液流速率(sap flux density,  $F_d$ )进行连续监测(2019-8-7—2019-10-22)。探针长度10 mm,将探针安装在茎距地1.3 m处的北侧,并用铝膜覆盖,以防止由于太阳辐射引起误差,用玻璃胶和胶带封住铝膜与树干之间的缝隙,以免树干径流的影响。采用CR1000数据采集器记录监测数据,测量间隔60 s,记录间隔30 min。

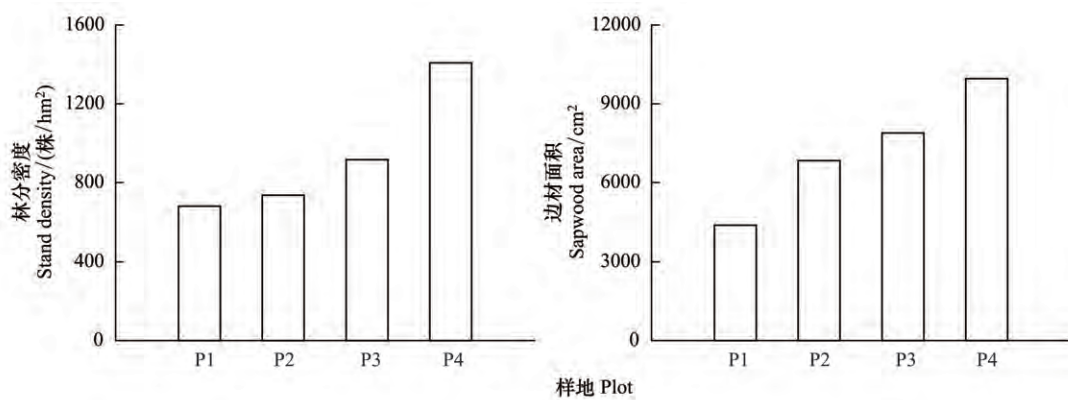


图2 4个样地疏伐后林分密度与边材面积对比

Fig.2 Comparison of stand density and sapwood area of 4 plots after thinning

P1 表示样地 1 ,P2 表示样地 2 ,以此类推

#### 1.4 气象因子和土壤水分观测

气象因子: 样地附近空旷处设有微型自动气象观测站, 测定的指标主要有太阳辐射( solar radiation  $R_s$ ,  $W/m^2$ )、空气温度( air temperature  $T$ ,  $^{\circ}C$ )、相对湿度( relative humidity  $RH$ , %) 等, 测量间隔为 60 s, 记录间隔 30 min。采用饱和水汽压亏缺( vapor pressure deficit, VPD, kPa) 这一指标以反映空气温度与空气湿度的协同效应, 基于以下公式<sup>[26]</sup> 计算:

$$VPD = a \times \exp\left[\frac{bT}{T+c}\right] \times (1 - RH) \quad (1)$$

式中,  $T$  为空气温度( $^{\circ}C$ ),  $RH$  为空气相对湿度(%),  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为参数, 分别为 0.611 kPa、17.502、240.97  $^{\circ}C$ 。

土壤湿度: 使用土壤水分传感器( EC20) 监测各样地土壤体积含水量( soil volumetric water content, SWC,  $m^3/m^3$ )。在样地内挖掘 2 m 深土壤剖面, 在剖面的不同深度安装探针, 对土壤湿度进行实时监测, 探针安装深度分别为 5、10、20、40、60、80、100、150、200 cm。测量间隔为 60 s, 记录间隔 30 min, 与树干液流观测同步。

#### 1.5 数据分析方法

本研究通过构建树木胸径与边材面积及树皮厚度之间的数量关系来计算样木的边材面积与树皮厚度。边材面积和胸径之间的关系可以采用幂函数( $y = ax^b$ ) 表示<sup>[27]</sup>, 树皮厚度与胸径之间的关系可以用函数( $y = ax + b$ ) 来估算<sup>[28]</sup>, 将样地中刺槐树干横截面样本的胸径分别与边材面积及树皮厚度进行拟合建立公式(图 3)。

研究表明应用热扩散技术会低估树干液流速率值, 需进行物种特异性校准<sup>[29]</sup>, 有研究<sup>[8]</sup> 根据 Granier 液流计算公式对刺槐树干液流速率进行实验室校准, 得到校准后的公式如下:

$$F_d = 0.0510 K^{-1.180} \quad (2)$$

$$K = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \quad (3)$$

式中  $F_d$  ( $g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ ) 为边材液流速率,  $\Delta T$  ( $^{\circ}C$ ) 为加热探针与参考探针的瞬时温差值,  $\Delta T_{\max}$  ( $^{\circ}C$ ) 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差值, 即  $\Delta T$  ( $^{\circ}C$ ) 的最大值。

当探针的长度大于边材宽度时, 一部分被插入非导水木材, 计算得到的液流速率存在误差<sup>[30]</sup>, 为避免  $F_d$  ( $g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ ) 值被低估, 利用公式 4<sup>[31]</sup> 对  $\Delta T$  ( $^{\circ}C$ ) 进行校正。

$$\Delta T_{sw} = \frac{\Delta T - b\Delta T_{\max}}{a} \quad (4)$$

$$T_s = \left(\frac{DBH}{2} - T_b\right) \pm \sqrt{\left(\frac{DBH}{2} - T_b\right)^2 - \frac{A_s}{\pi}} \quad (5)$$

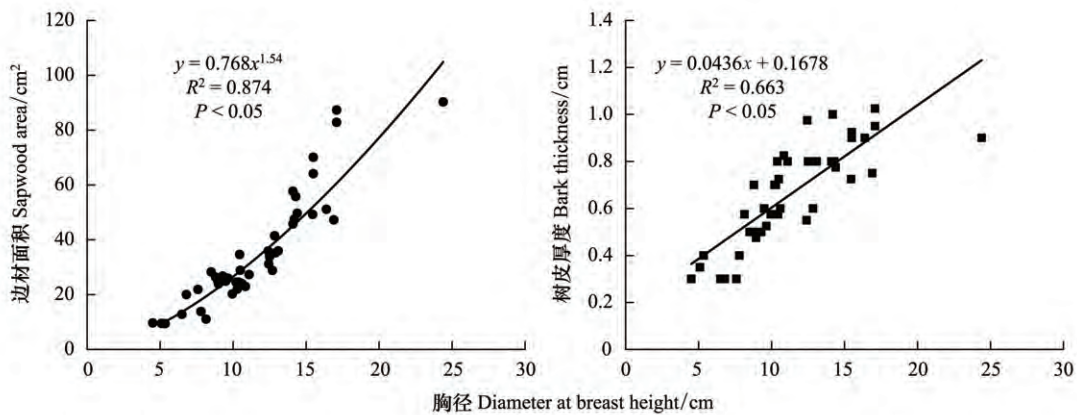


图3 刺槐边材面积及树皮厚度与胸径之间的关系

Fig.3 The relationship between sapwood area ( $A_s$ ) and diameter at breast height (DBH) and bark thickness ( $T_b$ ) and diameter at breast height (DBH) of *R.pseudoacacia*

式中,  $a$  为探针在边材中的部分占整个探针长度的比例,  $b$  为探针在非边材即心材中的部分占整个探针的比例 ( $b = 1 - a$ ),  $\Delta T_{sw}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 为校正后两探针之间的温差, 以替代公式 3 中的  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )。为确定参数  $a$ 、 $b$  需估算边材厚度<sup>[28]</sup>(公式 5)。式(5)中,  $T_s$  (cm) 为边材厚度, DBH (cm) 为胸径,  $T_b$  (cm) 为树皮厚度,  $A_s$  ( $\text{cm}^2$ ) 为边材面积。

样地尺度平均液流速  $J_s$  ( $\text{kg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) 的计算采用如下公式:

$$J_s = \frac{\sum_{i=1}^n F_{di} \times A_{si}}{\sum_{i=1}^n A_{si}} \quad (6)$$

$$Q = J_s \times \frac{A_{ST}}{A_G} \quad (7)$$

式中,  $J_s$  ( $\text{kg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) 是样地尺度平均液流速率,  $F_{di}$  ( $\text{kg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) 是第  $i$  株样木液流速率,  $A_{si}$  ( $\text{cm}^2$ ) 是第  $i$  株样木的边材面积,  $n$  为样地被测样木总数。式(7)中,  $Q$  (mm/d) 是林分蒸腾,  $J_s$  ( $\text{kg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) 是样地尺度液流速率,  $A_{ST}$  ( $\text{cm}^2$ ) 是样地边材面积总和,  $A_G$  ( $\text{m}^2$ ) 是样地面积。

采用 Spearman 相关分析探究单株及林分尺度蒸腾与环境因子之间的关系, 采用非参数检验的方法对不同疏伐强度样地蒸腾差异性进行检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 疏伐前后林地树木径级、边材面积的变化

将疏伐强度不同的 4 个样地中所有的树木的调查数据归纳整理后进行径阶划分, 结果如图 4。疏伐前后 4 个人工样地的刺槐径级分布均呈现“正态分布”的形式。疏伐前, 样地 1、样地 3、样地 4 (对照样地) 径阶分布峰值为 5—10 cm 径阶, 样地 2 的分布峰值为 10—15 cm 径阶。疏伐后径级分布得到调整, 样地 1、样地 4 (对照样地) 径阶分布峰值仍为 5—10 cm 径阶, 但样地 1 该径阶刺槐占比由 59.86% 减小为 51.76%; 样地 2 径阶分布峰值仍为 10—15 cm 径阶, 该径阶刺槐占比由 41.27% 增加至 50.54%; 样地 3 的分布峰值由 5—10 cm 径阶变为 10—15 cm 径阶, 疏伐使样地 3 中 5—10 cm 径阶刺槐占比由 43.44% 降至 28.82%, 10—15 cm 径阶刺槐占比由 42.24% 变为 55.46%; 整体而言, 疏伐后样地 1—3 的径级分布均呈现出 0—5 cm 径阶、5—10 cm 径阶刺槐的占比减小, 10—15 cm 径阶、15—20 cm 径阶刺槐占比增大的趋势。

疏伐后各样地边材面积总和的大小顺序与林分密度大小顺序一致 (图 2), 样地边材面积由大到小分别为



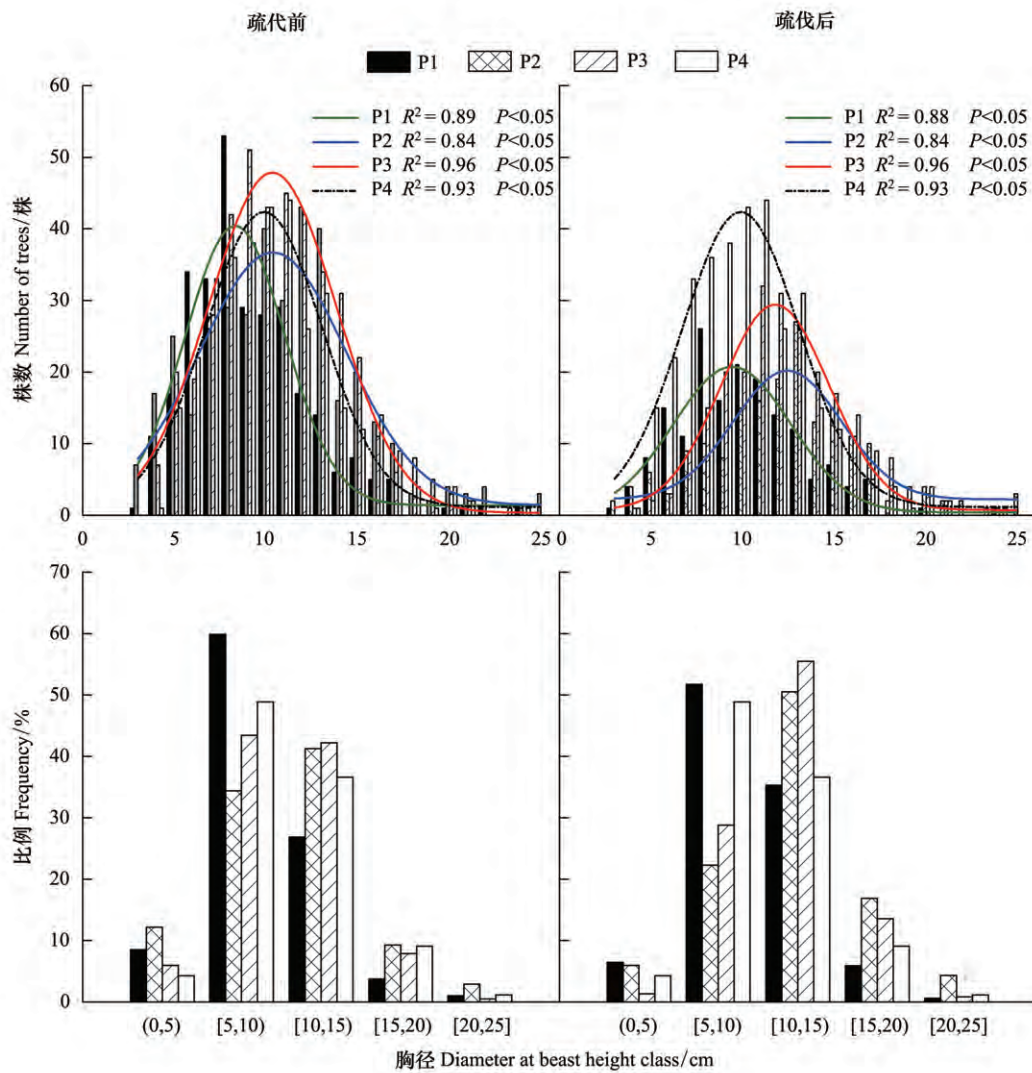


图 4 疏伐前后不同疏伐强度各径阶数量、比例分布图

Fig.4 Number and frequency of trees in different diameter at breast height ( DBH) classes of 4 plots in pre-thinning and after-thinning , thinning intensity decreases from plot 1 to plot 4 ,the curves are made by Gaussian fit

图中曲线通过高斯曲线拟合得到

样地 4( 9960 cm<sup>2</sup> )、样地 3( 7890 cm<sup>2</sup> )、样地 2( 6836 cm<sup>2</sup> )、样地 1( 4397 cm<sup>2</sup> )。

## 2.2 单株尺度液流速率变化

### 2.2.1 半小时尺度单株液流速率变化

液流速率是衡量单株尺度蒸腾速率的指标。在半小时尺度上,3 个连续的晴天( 2019-9-3—2019-9-5) 各样地单株尺度液流速率日动态过程如图 5 所示。样地 1—4 单株尺度液流速率呈现规律性的昼夜交替变化, 启动时刻约为 8:00, 达到峰值的时刻约为 11:00, 迅速下降的时刻约为 16:00, 凌晨与午夜仍有液流存在。样地 1、样地 2、样地 3、样地 4 典型日单株液流速率的平均值分别为: 0.0088、0.0068、0.0054、0.0053 g cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 各样地半小时尺度液流速率在午夜与凌晨时段差异小, 其余时段差异明显。将样地 1—4 在 3 个典型日液流速率峰值的平均值进行对比, 样地 1 最高( 0.0221 g cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ), 其次为样地 2( 0.0187 g cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ), 均高于样地 3 ( 0.0146 g cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ) 与样地 4( 0.0144 g cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> )。

### 2.2.2 日尺度单株液流速率变化

观测期内, 样地 1—4 日尺度单株液流速率整体呈下降趋势, 样地间差异逐渐缩小( 图 5)。8 月, 样地 1 液

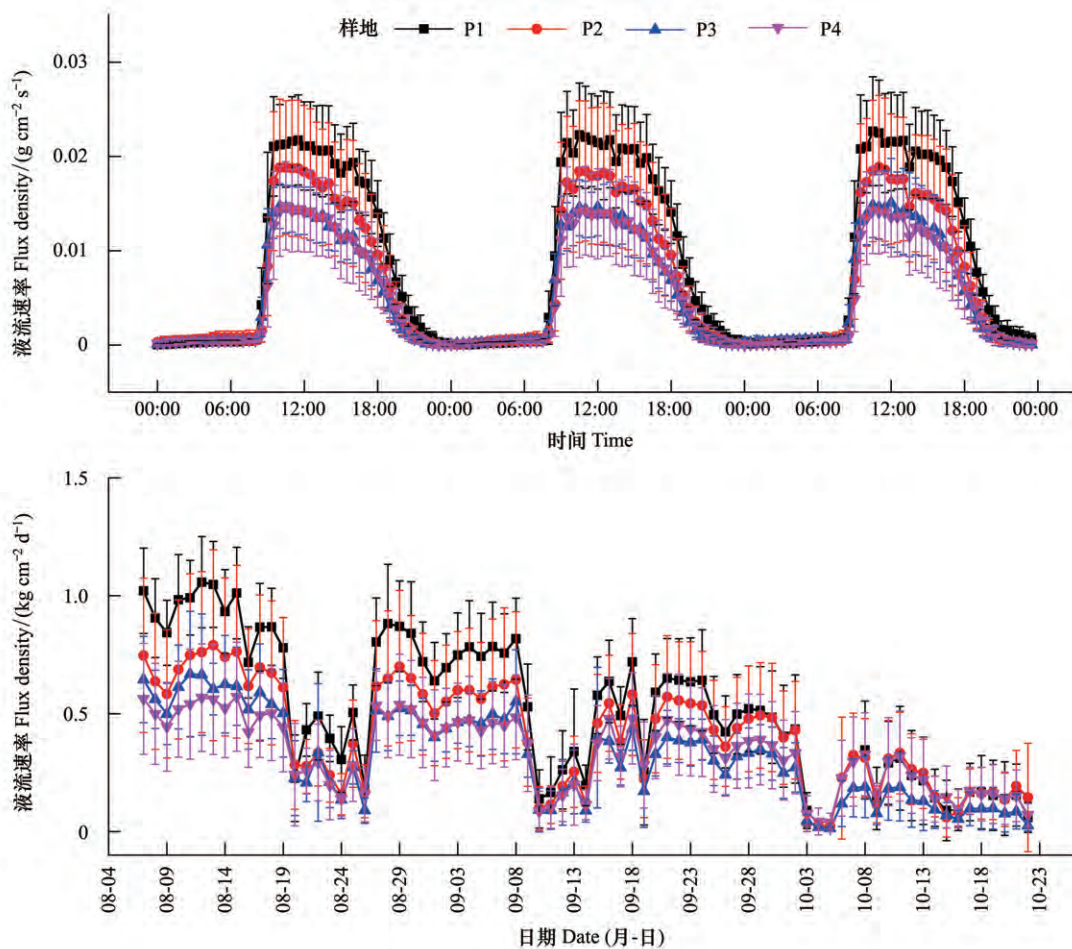


图5 半小时与日尺度样地1—4液流速率变化动态

Fig.5 Changes of sap flux density ( $F_d$ ) in 4 plots in half hour and daily scale

流速率最大,其次为样地2,再为样地3,样地4最小;9月样地4液流速率超过样地3,样地3液流速率最小,样地1与其它样地之间的差异缩小,至10月,样地1、样地2、样地4的液流速率差异细微,仍高于样地3。观测期内样地1、样地2、样地3、样地4单株液流速率平均值分别为0.53、0.41、0.31、0.33  $\text{kg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ (图6)。与变化趋势图展现出的样地间差异一致,Kruskal-Wallis H检验结果表明,样地1、2之间液流速率差异不显著,但均显著高于样地3( $P < 0.05$ ),而样地3、4之间无显著差异( $P > 0.05$ )。整体而言,日尺度单株液流速率随林分密度增大(疏伐强度减小)整体呈现下降趋势。

### 2.3 林分尺度蒸腾的变化

有关研究显示树木根部吸收的水分99.9%用于蒸腾,通过精确计算液流积累量可以基本确定植物蒸腾耗水量<sup>[18]</sup>。林分尺度蒸腾量跟边材面积和样地平均液流速率关系密切。在观测期(2019-8-7—2019-10-22)内,各样地日平均蒸腾量由高到低为样地4(1.44 mm/d)、样地2(1.18 mm/d)、样地3(1.04 mm/d)、样地1(0.90 mm/d)(图7),这与样地液流速率及边材面积的大小关系有所不同。样地1、3、4的日均蒸腾量与其边材面积的大小关系相对一致,样地1的平均液流速率最高,其日均蒸腾量却小于液流速率最低的样地3,这说明大的边材面积可以在一定程度上弥补较低液流速率带来的影响;而样地边材面积较小的样地2由于较高的液流速率获得高于样地3的日均蒸腾量,也说明当边材面积差异不大的情况下,液流速率大可以使边材面积较小的样地获得较高的日均蒸腾量。整体而言,随林分密度增大(疏伐强度减小),林分日均蒸腾量整体呈上升趋势。

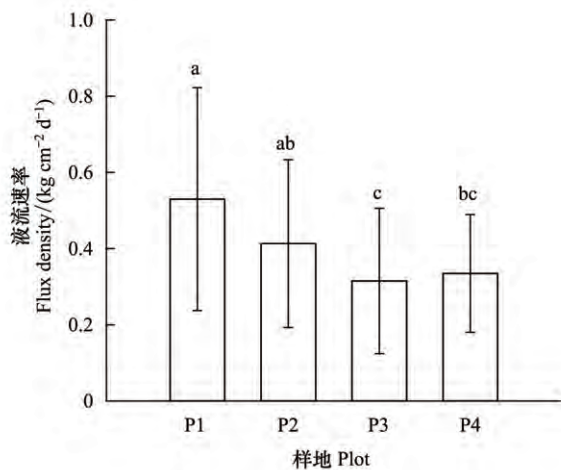


图6 观测期日尺度单株液流速率平均值

Fig.6 Average day scale sap flux density ( $F_d$ ) of 4 plots in experimental periods

不同小写字母表示样地间日尺度单株液流速率差异显著 ( $P < 0.05$ )

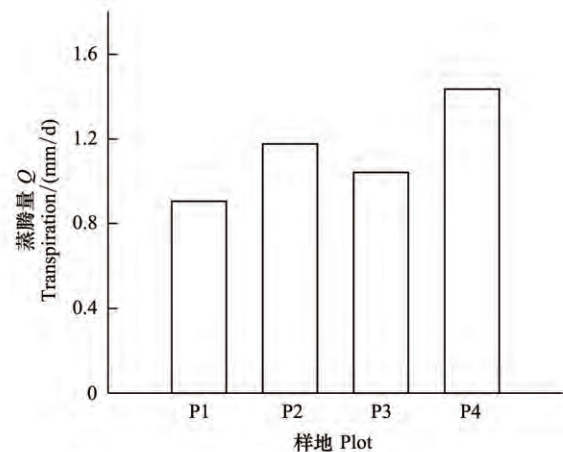


图7 观测期日均蒸腾量

Fig.7 Transpiration ( $Q$ ) of 4 plots

## 2.4 液流速率与环境因子的关系

### 2.4.1 半小时尺度

将3个典型日(2019-9-3—2019-9-5)半小时尺度液流速率与对应时刻各环境因子做相关分析,结果显示(表1)在4个样地中半小时尺度单株液流速率均与太阳辐射、空气温度、饱和水汽压亏缺、土壤体积含水量呈现正相关,与相对湿度呈现负相关。影响4个样地半小时尺度液流速率的主要环境因子为太阳辐射与空气温度,4个样地半小时尺度液流速率均受太阳辐射的影响最大,Spearman相关系数超过0.8;样地1—3液流速率与空气温度的相关系数仅次于液流速率与太阳辐射的相关系数,样地4液流速率与空气温度的相关系数为0.806,与相关系数绝对值排在第二位的0.808相差较小,因此认为空气温度对液流速率的影响仅次于太阳辐射。相对湿度、饱和水汽压亏缺也对液流速率都有较大的影响。4个样地半小时尺度单株液流速率与环境因子之间的相关性呈现出较为一致的情况,说明在半小时尺度上,样地间单株液流速率与环境因子关系没有显著差异。

表1 环境因子与半小时尺度液流速率的 Spearman 相关系数

Table 1 Spearman correlation coefficient of environmental factors to half-hour sap flux density

因子 Factors	液流速率 Flux density / ( $g\ cm^{-2}\ s^{-1}$ )			
	样地 1 P1	样地 2 P2	样地 3 P3	样地 4 P4
太阳辐射强度 Solar radiation / ( $W/m^2$ )	0.883 **	0.908 **	0.902 **	0.888 **
空气温度 Air temperature / $^{\circ}C$	0.847 **	0.746 **	0.750 **	0.806 **
空气相对湿度 Relative humidity / %	-0.827 **	-0.741 **	-0.729 **	-0.808 **
饱和水汽压亏缺 Vapor pressure deficit / kPa	0.829 **	0.739 **	0.732 **	0.805 **
土壤体积含水量 Soil volumetric water content / ( $m^3/m^3$ )	0.376 **	0.529 **	0.231 **	0.530 **

P1 表示样地 1, P2 表示样地 2, 以此类推; \*\* 表示该值在  $P=0.01$  水平(双侧)显著

液流速率的日动态曲线与太阳辐射、空气温度、相对湿度、饱和水汽压亏缺的变化规律相吻合。太阳辐射与空气温度的启动时刻早于液流速率,达到峰值的时间滞后于液流速率;空气相对湿度与液流速率呈现相反的变化趋势,其迅速下降的时刻与液流速率启动时刻基本一致,达到谷值的时刻滞后于液流速率达到峰值的



时刻; 饱和水汽压亏缺的迅速增加的时刻与液流速率启动时刻基本一致, 但其达到峰值的时刻滞后于液流速率。由于 4 个样地液流速率的启动时刻、达到峰值时刻、迅速下降时刻基本一致, 因此各样地液流速率与环境因子的时滞没有显著差异。气象因子与液流速率时滞现象是由于清晨太阳辐射弱, 气温低, 液流速率变化缓慢, 随着太阳辐射逐渐增强, 空气相对湿度下降, 气孔导度不断升高, 液流速率增强达到峰值, 此时有利于蒸腾的气象因子仍在不断增加(减小)至峰值(谷值)的过程中, 植物为防止大量耗水, 液流速率开始缓慢下降, 表现为液流速率达到峰值的时刻提前于气象因子<sup>[7]</sup>。

#### 2.4.2 日尺度

将样地 1—4 观测期(2019-8-7—2019-10-22) 日尺度单株液流速率与环境因子做相关分析, 结果表明(表 2) 样地 1—4 日尺度单株液流速率均与太阳辐射、大气温度、空气相对湿度、饱和水汽压亏缺、土壤体积含水量存在显著相关性, 4 个样地日尺度单株液流速率均受饱和水汽压亏缺影响最大(Spearman 相关系数分别为 0.868、0.913、0.843、0.881) 样地 1、样地 2、样地 4 日尺度单株液流速率与太阳辐射的相关系数仅次于饱和水汽压亏缺, 样地 3 则受气温影响较大。各样地日尺度单株液流速率均与相对湿度、土壤体积含水量呈现负相关。整体来看 4 个样地日尺度单株液流速率与环境因子之间的关系无明显差异。利用指数饱和模型( $y = a(1 - e^{-bx})$ ) 来拟合饱和水汽压亏缺与日尺度单株液流速率<sup>[32]</sup>, 发现饱和水汽压亏缺日均值与液流速率的关系符合指数饱和曲线的形式(图 8), 曲线的斜率可以反映从土壤到大气的水力传导, 斜率大说明导度高<sup>[33-34]</sup>, VPD<0.8 kPa 时, 样地 1 斜率最大, 其次为样地 2, 再为样地 4, 样地 3 斜率最小, 表明导度由高到低为样地 1、样地 2、样地 4、样地 3。在 VPD 约为 0.8 kPa 时, 样地 4 首先接近阈值, 此后样地 4 液流速率趋于平稳, 样地 1—3 曲线斜率减小。Kruskal-Wallis H 检验结果表明, 不同 VPD 级别下, 样地间日尺度单株液流速率差异不同(图 8)。VPD<0.2 kPa、0.2 kPa< VPD<0.5 kPa、两个级别下 4 个样地间日尺度单株液流速率无显著差异, 随饱和水汽压亏缺增大, 样地间的差异增大。

表 2 日尺度环境因子与单株液流速率的 Spearman 相关系数

Table 2 Spearman correlation coefficient of environmental factors to day scale sap flux density

因子 Factors	液流速率 Flux density/( $\text{kg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ )			
	P1	P2	P3	P4
太阳辐射强度 Solar radiation/( $\text{W/m}^2$ )	0.804**	0.855**	0.784**	0.842**
空气温度 Air temperature/ $^{\circ}\text{C}$	0.777**	0.727**	0.798**	0.658**
空气相对湿度 Relative humidity/%	-0.758**	-0.819**	-0.730**	-0.794**
饱和水汽压亏缺 Vapor pressure deficit/kPa	0.868**	0.913**	0.843**	0.881**
土壤体积含水量 Soil volumetric water content/( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	-0.580**	-0.560**	-0.677**	-0.525**

\*\* 表示该值在  $P=0.01$  水平(双侧)显著

### 3 讨论

在本研究中, 单株蒸腾速率随疏伐强度的增加呈现整体增大的趋势, 这可能是因为疏伐降低了林分密度, 林分郁闭度减小, 林分内部气象条件改变, 冠层能够获得更多的太阳辐射, 提高了树木的蒸腾速率<sup>[35-37]</sup>。一方面, 本研究发现, 半小时液流速率受太阳辐射影响最大(表 1)。太阳辐射是调节气孔运动的主要环境信号, 其促使气孔开放, 减少内部阻力, 从而增强蒸腾作用<sup>[35]</sup>。疏伐后, 冠层接受更多的有效辐射, 不仅直接影响树干液流速率, 而且还会通过影响大气温度及湿度间接对树干液流产生影响<sup>[36]</sup>。另一方面, 林分内的夏季气温随疏伐强度的加大而提高<sup>[37]</sup>, 大气温度增高使叶内外蒸气压差加大, 有利于水分从叶内溢出, 有可能促使蒸腾加强。疏伐使空气的流动速度增大, 林内大气相对湿度随疏伐的强度的增加而降低<sup>[37]</sup>, 空气相对湿度降低使叶内外蒸气压差增大, 加速蒸腾<sup>[35]</sup>。

对于林分尺度而言, 疏伐后样地林分密度得到调整, 10—15 cm 径阶、15—20 cm 径阶的刺槐数量占比增

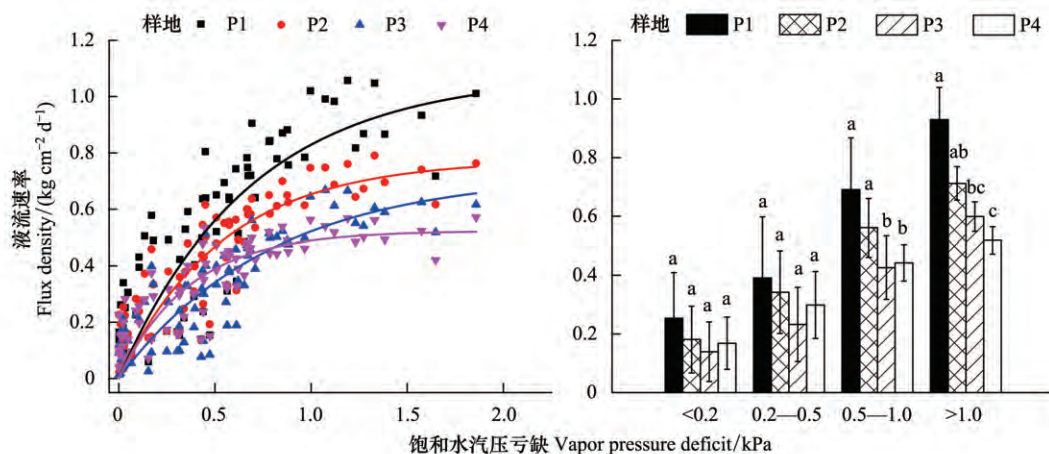


图8 饱和水汽压亏缺 (VPD) 与样地 1—4 刺槐边材液流速率的关系

Fig.8 Relationship between vapor pressure deficit (VPD) and sap flux density ( $F_d$ ) during the experimental period in 4 plots

不同小写字母表示表示样地间液流速率差异显著 ( $P < 0.05$ )

大,最终样地之间边材面积总和的大小顺序与林分密度的大小顺序一致:样地 1<样地 2<样地 3<样地 4。林分密度大(疏伐强度小)的样地单株液流速率更低,但其更大的边材面积可以在一定程度上弥补液流速率低这一劣势,使林分日均蒸腾量随林分密度增加呈现上升趋势。对照样地(样地 4)在半小时与日尺度的单株液流速率均低于样地 1 和样地 2,但更大的样地边材面积使样地 4 的日均蒸腾量高于样地 1 和样地 2。

在 4 个样地中,液流速率每天的启动时间以及到达峰值的时间与气象因子迅速增长以及到达峰值存在一定的时滞。在有利于蒸腾的环境因子不断增加至峰值的过程中,为防止大量耗水,大多数温带树种在中午之前实施气孔调节,使液流速率不再持续增加,在较为干燥的夏季,多数植物会通过迅速关闭气孔来维持水势<sup>[38]</sup>,这体现了植物的耗水策略。已有研究表明,疏伐后冠层接受更多的太阳辐射使叶片更易受到水分胁迫,导致树木水分利用对环境条件更加敏感<sup>[39]</sup>,在本研究中,半小时尺度单株液流速率与环境因子的时滞差异并不明显,而日尺度上饱和水汽压差的增大使蒸腾作用逐渐增强且样地间液流速率的差异逐渐显著。这说明样地间液流速率的差异受到环境因子的限制,在有利于蒸腾的环境因子达到一定程度时差异出现,但该环境因子的影响有限,随饱和水汽压亏缺增大,液流速率逐渐趋于稳定,差异也趋于稳定。

本研究存在一些不足之处,一方面本研究仅设置了 4 个样地,且疏伐强度集中在 35% 至 52% 之间,由于疏伐强度的梯度不够多,难以刻画刺槐林林分日均蒸腾量随疏伐强度变化的精准情形,且其它疏伐强度对刺槐林林分日均蒸腾量的影响也无法得知。已有研究<sup>[6]</sup>表明,在 1400 株/hm<sup>2</sup>至 2200 株/hm<sup>2</sup>之间,林分蒸腾耗水量先增大后减小,当密度在 1400—1800 株/hm<sup>2</sup>,日均蒸腾量随林分密度增大呈上升趋势,林分密度为 1800 株/hm<sup>2</sup>时,日均蒸腾量达到最大值,当林分密度继续增大到 2000 和 2200 株/hm<sup>2</sup>时,日均蒸腾量处于较低的水平。在本研究中样地 3(疏伐强度 35%)林分日均蒸腾量低于样地 4(对照样地),不符合疏伐强度与日均蒸腾量展现出的整体规律,该现象是否可以印证蒸腾耗水量随疏伐强度减小(林分密度增大)先增大后减小的规律,仍需要设置更多的疏伐强度梯度以探明疏伐强度对蒸腾的影响规律。另一方面,本研究只探究了疏伐对蒸腾的短期影响(疏伐后 1—2 个月),其中单株刺槐蒸腾在未疏伐的对照样地与疏伐强度 35% 及疏伐强度 48% 的样地之间并不存在显著的差异,这可能是由于采取疏伐措施后不久就进行观测,此时林地土壤水分状况尚未因林分密度变化而改变<sup>[40]</sup>,因此在不同的样地间单株蒸腾并未出现显著差异。疏伐长时间后,林分密度的变化造成土壤水分状况改变的同时也会影响树木生长,进而影响蒸腾。研究发现,由于间伐林分的高胸径生长率,间伐林分和未间伐林分的断面积差异在间伐后的 3 年观察期内逐渐减小<sup>[41]</sup>。疏伐后 30 年,低密度林分的胸径生长速率高于中密度林分,疏生林在个体水平上的边材面积随树木生长而增大<sup>[39]</sup>。在林分水平上,由于胸径生长速度较快,疏伐导致减少的林分总断面积和边材面积可以更快地恢复,并随着时间的推移

达到接近密林的水平,在生长季稀疏林分的液流速率以及林分蒸腾量高于高密度林分<sup>[39]</sup>。除此之外,树干液流与环境因子的关系受时间尺度影响较大。较小时间尺度下,树干液流受与叶片相关的环境因子影响较大,较大时间尺度下,受与根系相关的生态因子影响更明显<sup>[42]</sup>。同时,本研究发现,不同疏伐强度的样地间环境因子与液流速率的相关系数的大小关系相对一致,说明在短期内(2个月),疏伐未对蒸腾—环境关系产生明显的影响。因此采取疏伐措施长时间后,由林分密度的改变造成的影响仍需进一步研究。最后,合理密度是指在該密度条件下,土壤的供水能力能够满足林木生长需要,而不出现土壤水分亏缺造成干化的造林密度<sup>[43]</sup>。本文仅从植被蒸腾的角度探讨了林分密度对植被水分利用的影响,未来应遵循“量水植树”的基本原则,以水量平衡为前提对土壤—植被系统进行综合分析,从而确定合理的林分密度<sup>[44]</sup>。

#### 4 结论

通过开展刺槐林不同疏伐强度的控制试验发现,疏伐对刺槐蒸腾的影响在单株尺度与样地尺度不同,即随着疏伐强度的增加刺槐单株尺度蒸腾呈增加的趋势,而林分尺度蒸腾呈下降的趋势。但是,未疏伐的对照样地与疏伐强度 35% 及疏伐强度 48% 样地的单株尺度蒸腾在短期内(2个月)并未体现显著的差异。另外,大气蒸腾动力(VPD)越大,各疏伐强度样地之间蒸腾差异越明显,表明环境条件在一定程度上也会对疏伐的蒸腾变化产生影响。研究结果初步反映了疏伐导致的林分密度变化对刺槐蒸腾的影响,将为黄土丘陵区刺槐林的结构改造、功能提升和土壤水分调控提供理论支持。

#### 参考文献(References):

- [1] 邵明安,贾小旭,王云强,朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- [2] Yang L, Chen L D, Wei W, Yu Y, Zhang H D. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 314-321.
- [3] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(6): 707-718.
- [4] 单长卷,梁宗锁,郝文芳. 黄土高原刺槐林生长与土壤水分关系研究进展. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1341-1346.
- [5] 许明祥,刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 40-46.
- [6] 周晓新,张建军,隋旭红,李轶涛,王清玉. 不同密度刺槐林在蒸腾旺季的蒸腾特征. 水土保持通报, 2010, 30(3): 41-47.
- [7] 胡伟,杜峰,徐学选,张良德. 黄土丘陵区刺槐树干液流动态分析. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1367-1373.
- [8] Ma C K, Luo Y, Shao M G, Li X D, Sun L, Jia X X. Environmental controls on sap flow in black locust forest in Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13160.
- [9] Wang Y L, Liu G B, Kume T, Otsuki K, Yamanaka N, Du S. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China. *Journal of Forest Research*, 2010, 15(4): 241-251.
- [10] 韦景树,李宗善,冯晓琦,张园,陈维梁,伍星,焦磊,王晓春. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [11] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,刘增文,温仲明. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 7-14.
- [12] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [13] 陈怡平,张义. 黄土高原丘陵沟壑区乡村可持续振兴模式. 中国科学院院刊, 2019, 34(6): 708-716.
- [14] 王翼龙. 黄土高原半干旱区两典型林分主要树种光合耗水特性及影响因素研究[D]. 杨陵: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [15] Schwärzel K, Zhang L L, Strecker A, Podlasly C. Improved water consumption estimates of black locust plantations in China's loess plateau. *Forests*, 2018, 9(4): 201.
- [16] 曹奇光,张学培,牛丽丽,杨文文. 晋西黄土区人工刺槐林生理生态特点分析与研究. 水土保持研究, 2007, 14(3): 330-332, 335-335.
- [17] 樊敏,马履一,王瑞辉. 刺槐春夏季树干液流变化规律. 林业科学, 2008, 44(1): 41-45.
- [18] 于占辉,陈云明,杜盛. 黄土高原半干旱区人工林刺槐展叶期树干液流动态分析. 林业科学, 2009, 45(4): 53-59.

- [19] 张华,王百田,郑培龙. 黄土半干旱区不同土壤水分条件下刺槐蒸腾速率的研究. 水土保持学报, 2006, 20(2): 122-125.
- [20] 周晓新,张建军,李轶涛. 黄土高原主要水土保持树种的蒸腾特性. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 44-48, 54-54.
- [21] Jiao L, Lu N, Fang W W, Li Z S, Wang J, Jin Z. Determining the independent impact of soil water on forest transpiration: a case study of a black locust plantation in the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2019, 572: 671-681.
- [22] Jiao L, Lu N, Fu B J, Wang J, Li Z S, Fang W W, Liu J B, Wang C, Zhang L W. Evapotranspiration partitioning and its implications for plant water use strategy: evidence from a black locust plantation in the semi-arid Loess Plateau, China. Forest Ecology and Management, 2018, 424: 428-438.
- [23] 邵颖,曹四平,曹文文,刘长海. 南泥湾湿地退化与管理对土壤动物多样性的影响. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 634-643.
- [24] 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. Science of the Total Environment, 2017, 609: 27-37.
- [25] 李松松,曹文文,曹四平,刘阳,刘长海. 南泥湾湿地土壤理化性质变化探析. 延安大学学报: 自然科学版, 2016, 35(4): 91-94.
- [26] 许文滔,赵平,王权,饶兴权,蔡锡安,曾小平. 基于树干液流测定值的马占相思 (*Acacia mangium*) 冠层气孔导度计算及数值模拟. 生态学报, 2007, 27(10): 4122-4131.
- [27] Vertessy R A, Benyon R G, O'Sullivan S K, Gribben P R. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. Tree Physiology, 1995, 15(9): 559-567.
- [28] Zhang J G, Guan J H, Shi W Y, Yamanaka N, Du S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China. Ecohydrology, 2015, 8(1): 137-147.
- [29] Steppe K, De Pauw D J W, Doody T M, Teskey R O. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7/8): 1046-1056.
- [30] 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.
- [31] Clearwater M J, Meinzer F C, Andrade J L, Goldstein G, Holbrook N M. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. Tree Physiology, 1999, 19(10): 681-687.
- [32] Ewers B E, Mackay D S, Gower S T, Ahl D E, Burrows S N, Samanta S S. Tree species effects on stand transpiration in northern Wisconsin. Water Resources Research, 2002, 38(7): 1103.
- [33] Du S, Wang Y L, Kume T, Zhang J G, Otsuki K, Yamanaka N, Liu G B. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(1): 1-10.
- [34] Oren R, Zimmermann R, Terborgh J. Transpiration in upper amazonia floodplain and upland forests in response to drought-breaking rains. Ecology, 1996, 77(3): 968-973.
- [35] 潘瑞炽. 植物生理学(第六版). 北京: 高等教育出版社, 2008: 23-24.
- [36] 刘潇潇,李国庆,闫美杰,杜盛. 黄土高原主要树种树干液流研究进展. 水土保持研究, 2017, 24(3): 369-373.
- [37] 姜林林. 抚育对北京侧柏林耗水及林分生长的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [38] 杨洁,吕金林,何秋月,闫美杰,李国庆,杜盛. 黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2607-2613.
- [39] Chen Z S N, Zhang Z Q, Chen L X, Cai Y M, Zhang H Q, Lou J P, Xu Z, Xu H, Song C H. Sparse *Pinus tabulaeformis* stands have higher canopy transpiration than dense stands three decades after thinning. Forests, 2020, 11(1): 70.
- [40] 李春明,杜纪山,张会儒. 抚育间伐对森林生长的影响及其模型研究. 林业科学研究, 2003, 16(5): 636-641.
- [41] Gebhardt T, Häberle K H, Matyssek R, Schulz C, Ammer C. The more, the better? Water relations of Norway spruce stands after progressive thinning. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 197: 235-243.
- [42] 赵春彦,司建华,冯起,鱼腾飞,李炜. 树干液流研究进展与展望. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 98-105.
- [43] 张建军,贺维,纳磊. 黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 55-59.
- [44] 武思宏,朱清科,余新晓,张学培. 晋西黄土区主要造林树种合理林分密度计算与分析. 水土保持研究, 2008, 15(1): 83-86.