

# 绿色矿山不同先锋树种蒸发量及碳汇研究

罗安荣 刘 婷 郭兴隆 史 鑫 杨 植\*

云南磷化集团有限公司/国家磷资源开发利用工程技术研究中心 云南昆明 650600

**摘要:**以云南省昆阳磷矿矿山生态修复区6种先锋树种为研究对象,采用热比法茎流仪与水分利用效率模型相结合的技术方法,测定生态恢复区13个位点不同树种树干茎流、蒸腾速率及碳汇强度,分析比较不同位点各树种树干茎流、蒸腾速率及碳汇强度之间的差异。结果表明生长季内不同位点各树种日平均茎流、蒸腾速率及碳汇强度基本随时间推移呈下降趋势,且单株树种树干茎流与蒸腾速率成显著正相关。同一树种碳汇强度随不同位点海拔的增加呈现增大的趋势。综合分析不同位点各树种,滇朴碳汇能力最优,雪松碳汇能力最差,其余树种差异不显著。

**关键词:** 不同位点; 树干茎流; 蒸腾速率; 碳汇

近年来,以二氧化碳为首的温室气体造成的环境和气候问题日益突出。碳排放限制政策和可再生能源已引起越来越多的关注。碳排放是导致全球变暖、生物多样性减少和海平面上升的主要原因,威胁着人类的可持续发展<sup>[1]</sup>。作为全球最大的温室气体排放国,中国已经制定了明确的目标,到2030年实现碳封顶,到2060年实现碳中和。现阶段,实现碳中和的战略除了减少化石能源燃烧和工农业生产中的碳排放,以及实施碳清除技术以抵消剩余的温室气体排放外,森林生态系统固碳也是温室气体减排的重要方式<sup>[2, 3]</sup>。并且与工业减排和其他碳捕获技术相比,森林碳汇在社会和经济上都具有成本效益,使其成为全球应对气候变化的重要战略<sup>[4-6]</sup>。

目前,关于森林碳储量估算方法已有许多国内外学者进行了研究,主要包括样地清查法、微气象学法、箱式法、模型模拟法、遥感估算法等<sup>[7]</sup>。样地清查法主要通过样地来估算研究地区部分植被生物量、碳蓄积量等<sup>[8]</sup>,包括生物量法、蓄积量法。生物量法其原理是通过大规模实地调查采集数据建立测量参数和生物量数据库,通过样地实测数据换算植被平均碳密度,再用每一种植被的面积乘以碳密度,即可得到地上部分植被碳储量<sup>[9]</sup>,该方法直接、简单易行,但实际调查时一般选取优势树种地段,估算结果远高于实际值。蓄积量法是对森林主要树种抽样实测并计算该树种平均容重,再通过森林蓄积总量计算生物量,最终利用碳量与生物量转换系数

估算森林部分植被固碳量<sup>[10]</sup>,该方法同样具备直接、明确、简单易行的特点,但容易受森林生态系统内其他因素的干扰,导致误差较大。微气象学法进行研究植被与大气间气体循环和能量交换通量的有效方法,主要包括涡旋相关法等。该方法通过利用三维超声风速仪测定森林冠层上方二氧化碳涡流传递速率来计算森林碳储量<sup>[11]</sup>。该方法是目前测定地-气交换最好的方法之一,能够直接长期对森林生态系统进行CO<sub>2</sub>通量测定,同时有能够为其他模型的建立和校准提供基础数据<sup>[12, 13]</sup>。但是该方法在连续观测时要求大气稳定且观测场地下垫面平整,因此对设备一起精度和地形气候要求高。箱式法是研究区域碳平衡最常用方法之一,操作简单,设备成本低,并且可以对森林生态系统各组分(树木茎秆、枝条、叶片、花和根系等)进行定量测定<sup>[14]</sup>,但由于箱式测定在密闭空间进行,改变了光温湿等自然环境因子,影响了植物的呼吸和光合作用,对结果造成误差。模型模拟法通过数学模型来估算森林碳储量,适用于估算一个地区理想条件下碳储量,虽然可适用于大尺度碳储量估算,但大多模型都是静态和经验估计模型,忽略了森林植被自然因素与气候条件的影响<sup>[15, 16]</sup>。遥感估算法主要是通过遥感技术和信息系统来获取植被指数、植被叶面积指数及植被覆盖度的关系来推算森林生物量<sup>[17, 18]</sup>。纵观森林碳储量估算,尽管方法多种多样,但每一种方法都有其优势与不足,不能够精确详细全方位检测森林碳汇能力<sup>[19, 20]</sup>。而介于叶片和生态系统尺度之间的单株尺度水碳交换研究方法和监测手段的不足导致不同植被的碳汇能力及其影响因素尚不明确<sup>[21]</sup>。

基于上述现状,本研究采用高精度茎流仪等传感器,精确感知树木蒸腾耗水状况,基于低功耗广覆盖的物联网技术,对试验区进行组网监测,结合基于水分光合生

**作者简介:** 罗安荣(1986—),男,陕西富平人,工程师,工学博士,从事矿山生态修复、碳减排与碳增汇技术、碳汇计量与测定的研究。

**\*通信作者:** 杨植(1983—),男,云南昭通人,工程师,从事矿山碳排放管理研究。

理过程的水分利用效率 (WUE) 模型, 实现树木碳汇强度的精确评估, 以期筛选出含碳固碳率高的优势树种, 筛选优质林草资源, 构建高效植被群落, 打造碳汇提升示范基地。

### 一、试验材料与方法

#### 1. 试验地概况

试验于2022年7月-12月在云南省昆明市晋宁区云南磷化集团有限公司昆阳磷矿生态修复区 (24° 43' 24.97" N、102° 33' 40.74" E, 海拔2160-2340 m) 进行, 该地属亚热带季风气候区, 年平均气温15℃, 年平均降水量1100 mm, 光热条件较好, 热量资源丰富, 夏季雨量充沛。复垦区受高原地貌及高原季风的影响, 主要地带性土壤为红壤, 垂直地带从8上至下为棕壤、黄棕壤、红壤。隐域性土壤有水稻土、冲积土、沼泽土等。各类土壤中以红壤的面积分布较大。

#### 2. 试验材料

试验区所处地区地处滇中高原区, 原生植被为亚热带半湿润常绿阔叶林, 主要代表树种有高山栲、元江栲、滇青冈、滇石栎、云南松、华山松、滇油杉、桉树、柏树、桉木等。根据相关资料和现场调查情况, 生态复垦区的优势树种为旱冬瓜、雪松、云南松、干香柏、滇朴、鹅掌楸等, 截至到2021年12月份, 公司累计植树造林5.50万亩, 土地可复垦植被率达到93.90%, 土地复垦植被率平均值为72.90%, 达到国际先进水平。试验树种及位点的选择如表1所示。

表1 生态复垦区试验位点及树种

试验点	树名	树周长 (cm)	直径 (cm)	海拔 (m)	海拔梯度	种植密度 (plants m <sup>-2</sup> )
1	雪松	27.5	8.75	2322.94	高	0.444
2	青冈栎	63.5	20.21	2261.46	中	0.25
3	干香柏	84	26.74	2255.18	中	0.111
4	雪松	70.2	22.35	2259.26	中	0.25
5	旱冬瓜	73.5	23.40	2260.56	中	0.25
6	雪松	82.3	26.20	2244.81	中	0.111
7	干香柏	94.5	30.08	2240.29	中	0.111
8	滇朴	98.4	31.32	2230.94	中	0.111
9	干香柏	64.5	20.53	2228.85	中	0.111
10	旱冬瓜	65.3	20.79	2221.65	中	0.25
11	鹅掌楸	43.6	13.88	2162.91	低	0.444
12	雪松	46.4	14.77	2162.86	低	0.111
13	干香柏	63.6	20.24	2176.72	低	0.111

#### 3. 试验方法

本试验采用热比法径流仪测定单株树木碳汇量, 选取均匀分布在复垦区所在地的12个数据点, 将13套热比

法径流仪 (SFM1, ICT中国, 北京禾流农业科技研究院) 分别安装在各树木茎干上。径流仪满足性能稳定、精度高, 能适应高海拔地区和矿山野外环境条件。鉴于生态修复区面积较大, 对多套径流仪进行了组网监测, 全天候监测各树木碳汇强度, 并将监测数据同步自动采集上云端, 以降低数据采集和设备损耗。本试验所取数据为径流仪安装后的7月-12月, 每30min自动获取数值一次。试验仪器如图1所示:



图1 径流仪及太阳能供电系统

#### 4. 测定项目

蒸腾速率、液流速率均用热比法径流仪测定, 植株周长用测树仪进行测定。光合水分利用效率 (WUE) 是单株树木CO<sub>2</sub>净同化量的基本理论。Farquhar将光合WUE定义为CO<sub>2</sub>净同化速率与蒸腾速率的摩尔比值<sup>[15]</sup>, 即WUE=A/E。因此, 可通过准确测量E和WUE来估算出A。利用热比法茎流计测量树木蒸腾速率E, 将碳同位素示踪技术与Farquhar光合生理模型相结合来测算WUE, 最终算出单株植物碳汇量。

#### 5. 数据分析

使用R Studio 3.6.1版进行多因素方差分析, 运用最小显著性差异法 (LSD) 在置信水平P<0.05时进行多重比较。绘图采用ggplot2、ggpubr、ggthemes等包<sup>[22]</sup>。

### 二、结果与分析

#### 1.7-12月不同位点各树种日平均茎流速率

由图2可知, 7-12月不同位点各树种日平均茎流速率变化显著 (P<0.05), 且不同位点各树种日平均茎流速率在生长季内随着时间的推移达到峰值后基本呈逐渐下降的趋势。对比不同位点各树种日平均茎流速率发现, 不同位点各树种日平均茎流速率从大到小依次为8 (滇朴)、9 (干香柏)、6 (雪松)、7 (干香柏)、3 (干香柏)、12 (雪松)、1 (雪松)、5 (旱冬瓜)、13 (干香柏)、4 (雪松)、10 (旱冬瓜)、2 (青冈栎)、11 (鹅掌楸)。8号位点树种滇朴的日平均茎流速率最大, 为1.33~13.11 cm h<sup>-1</sup>, 生长季内平均值为7.93 cm h<sup>-1</sup>; 9号位点树种干香柏日平均茎流速率次之, 为0.30~11.91 cm h<sup>-1</sup>, 生长季内平均值为6.70 cm h<sup>-1</sup>; 6号位点树种雪松日平均茎流速率仅

次于9号位点干香柏, 为1.14~11.37  $\text{cm h}^{-1}$ , 生长季内平均值为4.84  $\text{cm h}^{-1}$ ; 11号位点树种鹅掌楸日平均茎流速率最小, 为0~6.04  $\text{cm h}^{-1}$ , 生长季内平均值为3.02  $\text{cm h}^{-1}$ 。对比不同位点各树种日平均茎流速率还发现, 相同树种

在不同位点日平均茎流速率差异显著。综上, 不同位点各树种日平均茎流变化速率大小表现为滇朴>干香柏>雪松>旱冬瓜>青冈栎>鹅掌楸, 且同一树种日平均茎流速率受位点影响显著。

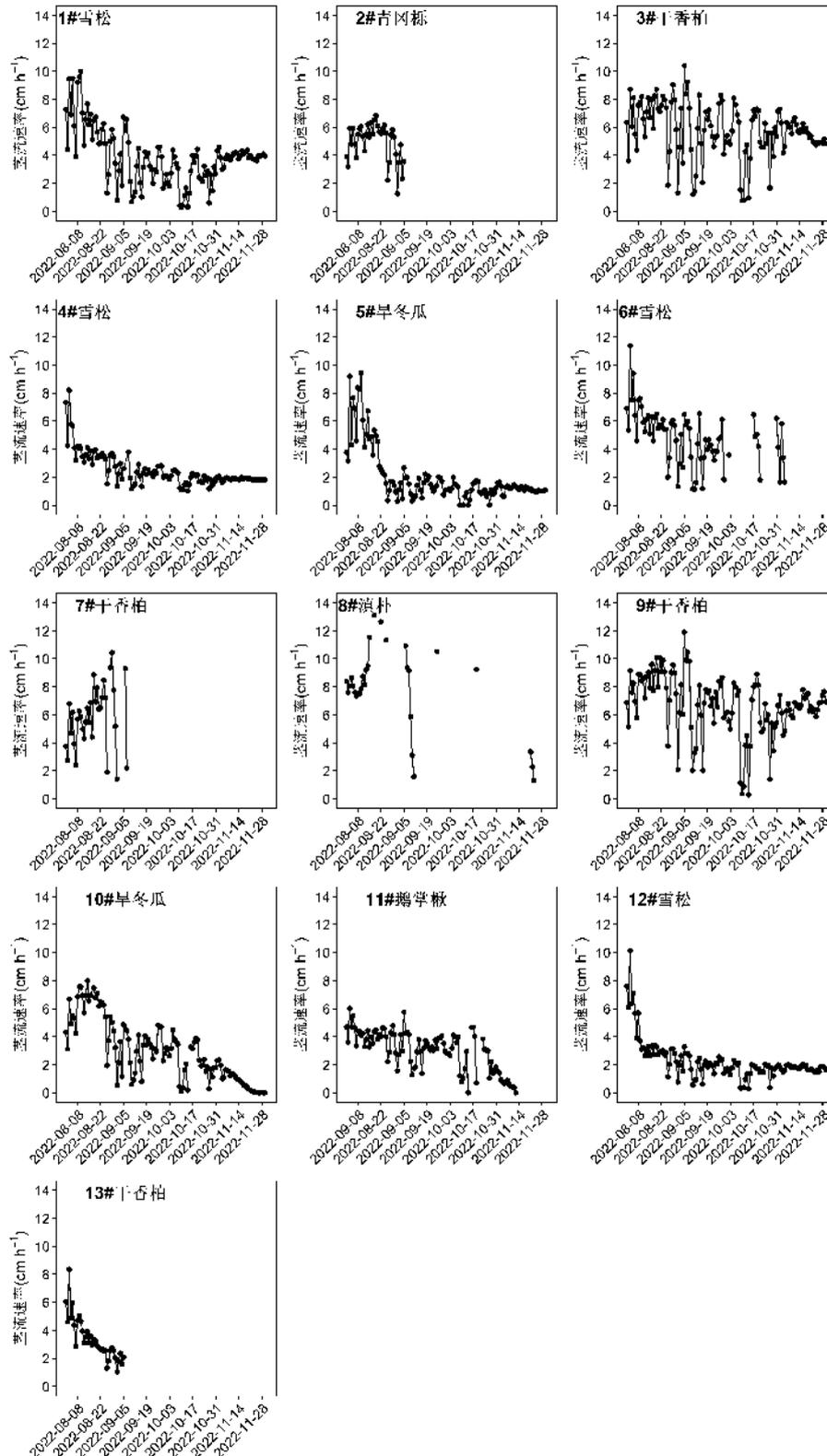


图2 7-12月不同位点各树种日平均茎流速率

### 2.7-12月不同位点各树种日蒸腾量

由图3可知, 7-12月不同位点各树种日蒸腾量变化显著 ( $P<0.05$ ), 且不同位点各树种日蒸腾量在生长季内随着时间的推移达到峰值后基本呈逐渐下降的趋势。对

比不同位点各树种日蒸腾量发现, 不同位点各树种日蒸腾量从大到小依次为5 (旱冬瓜)、4 (雪松)、8 (滇朴)、6 (雪松)、10 (旱冬瓜)、3 (干香柏)、7 (干香柏)、2 (青冈栎)、9 (干香柏)、11 (鹅掌楸)、13 (干香柏)、1

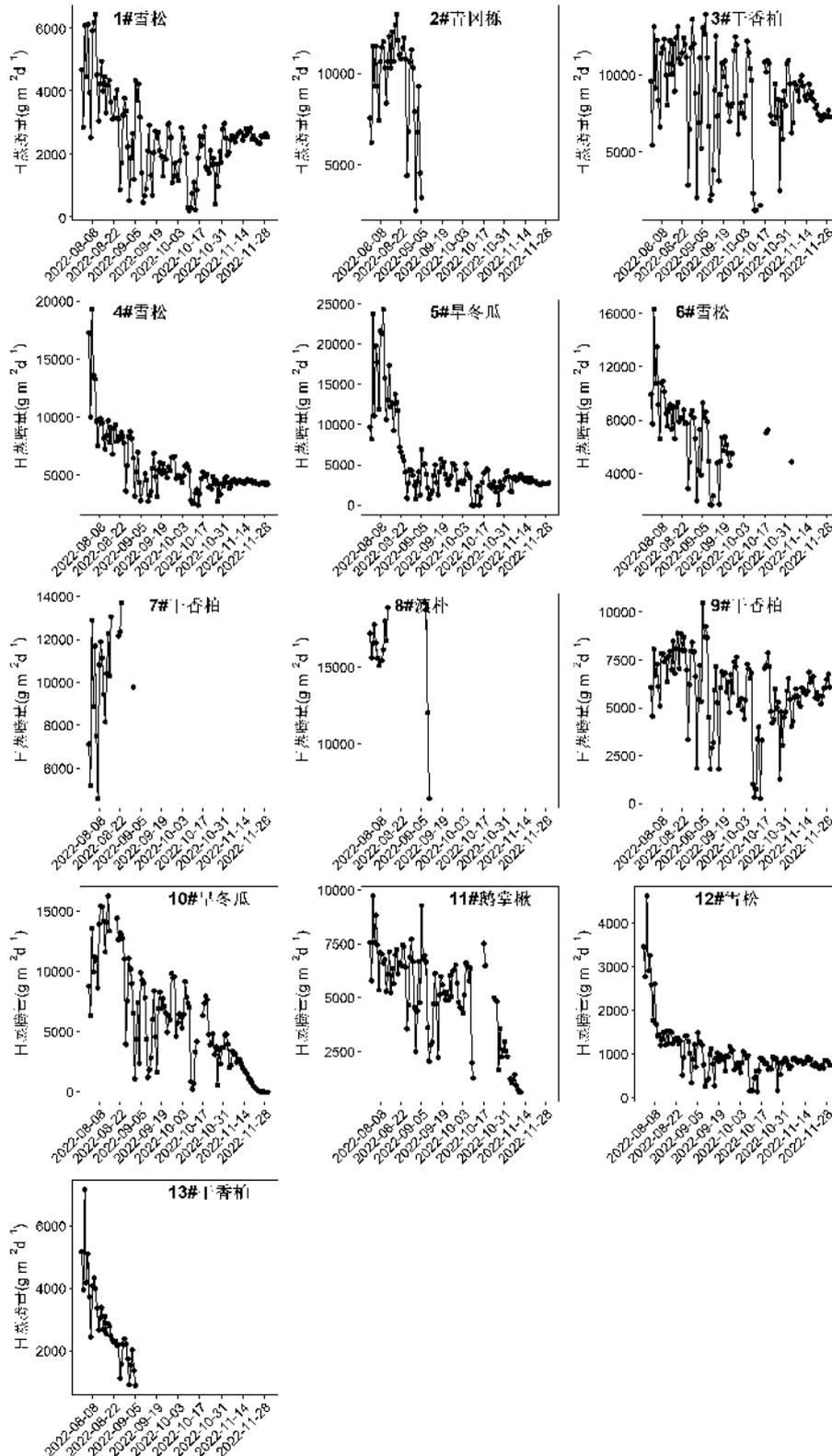


图3 7-12月不同位点各树种日蒸腾量

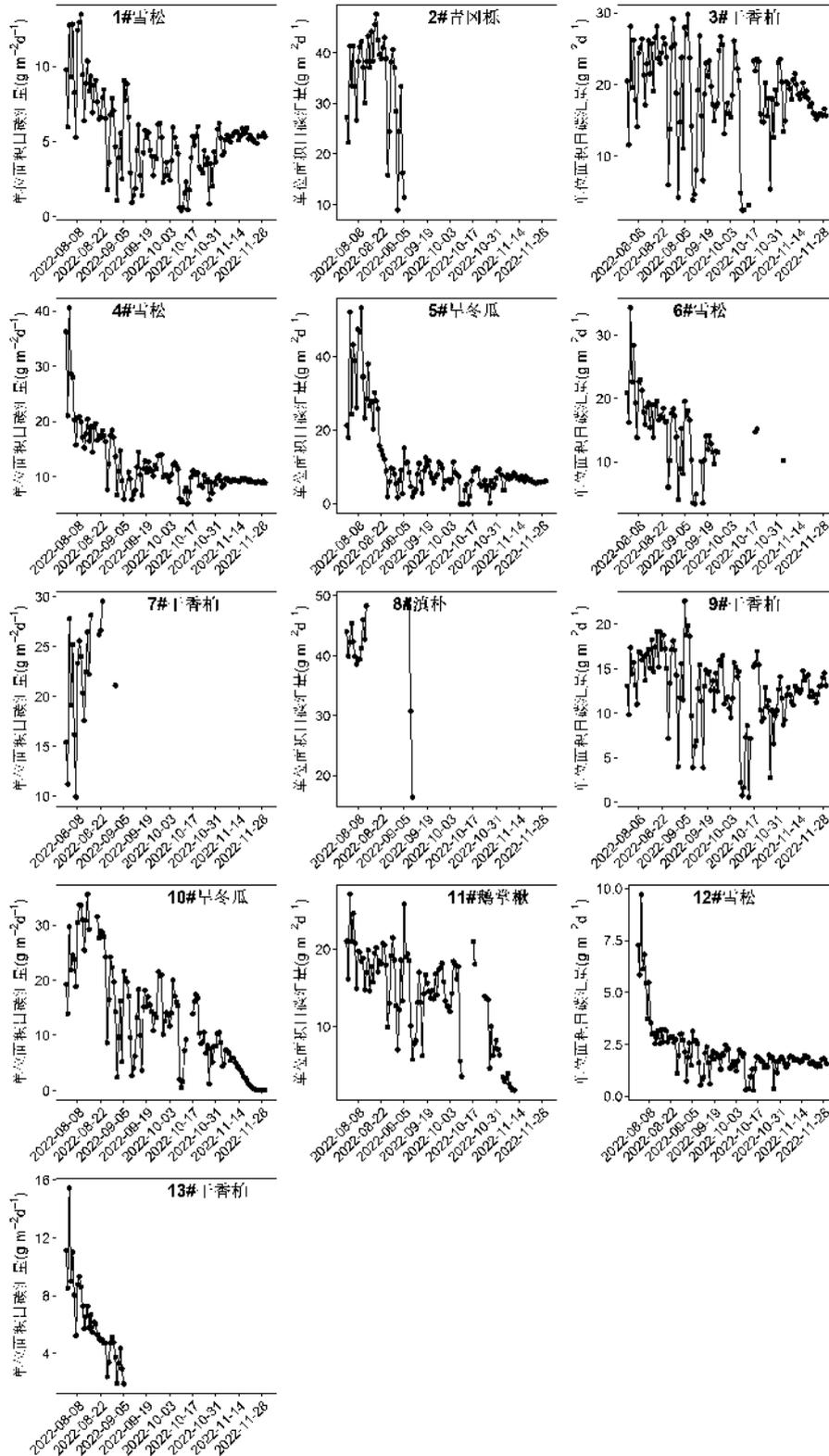


图4 7-12月不同位点各树种日碳汇量

(雪松)、12(雪松)。5号位点(旱冬瓜)日蒸腾量最大, 仅次于4号位点, 为6423~19235  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , 生长季内平均值为15984  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; 4号位点雪松日蒸腾量次之, 为2437~19328  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , 生长季内平均值为5771  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; 8号位点滇朴日蒸腾量

仅次于4号位点, 为6423~19235  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , 生长季内平均值为15984  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; 12号位点雪松日蒸腾量最小, 为133.20~4625.10  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , 生长季内平均值为1030.50  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。对比不同位点各树种日蒸腾量变化情况还发现, 同

一树种不同位点日蒸腾量差异显著。综合对比不同位点各树种日蒸腾量,早冬瓜最大,雪松最小,且同一树种日蒸腾量受位点影响显著。

#### 3.7-12月不同位点各树种日碳汇量

由图4可知,7-12月不同位点各树种日碳汇量差异显著( $P<0.05$ ),且不同位点各树种日碳汇量在生长季内随着时间的推移达到峰值后基本呈逐渐下降的趋势。对比不同位点各树种日碳汇量发现,不同位点各树种日碳汇量从大到小依次为5(早冬瓜)、8(滇朴)、2(青冈栎)、4(雪松)、10(早冬瓜)、6(雪松)、3(干香柏)、7(干香柏)、11(鹅掌楸)、9(干香柏)、13(干香柏)、1(雪松)、12(雪松)。5号位点树种早冬瓜日碳汇量最大,为 $0\sim 53.27\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ,生长季内平均值为 $11.10\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ;8号位点树种滇朴次之,为 $16.40\sim 49.11\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ,生长季内平均值为 $40.81\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ;2号位点树种青冈栎日碳汇量次于8高位点,为 $8.87\sim 47.66\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ,生长季内平均值 $34.26\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ;12号位点树种雪松日碳汇量最小,为 $0.28\sim 9.71\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ,生长季内平均值为 $2.16\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 。对比还发现,5号位点和10号位点树种均为早冬瓜,1号、4号、6号及12号位点树种均为雪松,但同以树种不同位点之间日碳汇量差异显著。综合对比不同位点各树种日碳汇量,结果表明早冬瓜、滇朴、青冈栎生长季内日碳汇量较高,雪松最低,同一树种日碳汇量大小受位点影响显著。

#### 4.不同树种茎流速率

由图5可知,不同树种日平均茎流速率存在显著差异( $P<0.05$ ),各树种日平均茎流速率大小依次为滇朴、干香柏、青冈栎、雪松、鹅掌楸、早冬瓜,平均值分别为 $7.93$ 、 $5.88$ 、 $4.97$ 、 $3.21$ 、 $3.02$ 、 $2.46\text{ cm h}^{-1}$ 。对比不同树种间日平均茎流速率可知,较日平均茎流速率最小树种早冬瓜相比,滇朴日平均茎流速率比早冬瓜高 $2.22$ 倍。综上,滇朴茎流速率最大,早冬瓜最小。

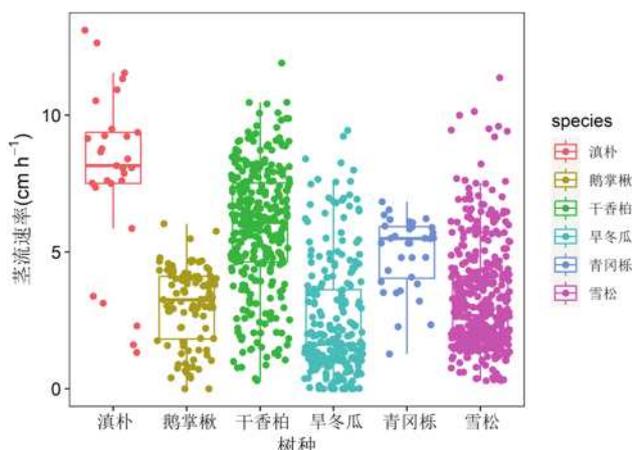


图5 不同树种茎流速率

#### 5.不同树种蒸腾速率

由图6可知,不同树种日平均蒸腾速率存在显著差异( $P<0.05$ ),各树种日平均蒸腾速率大小依次为滇朴、青冈栎、干香柏、早冬瓜、鹅掌楸、雪松,平均值分别为 $677.83$ 、 $398.66$ 、 $299.51$ 、 $231.35$ 、 $202.93$ 、 $156.07\text{ g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。对比不同树种间日平均蒸腾速率可知,较雪松相比,滇朴日平均蒸腾速率比雪松高 $3.34$ 倍。综上,滇朴蒸腾速率最大,雪松最小。

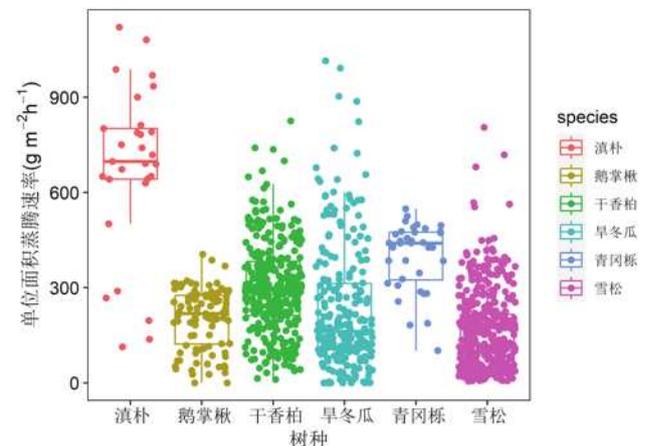


图6 不同树种单位面积蒸腾速率

#### 6.不同树种碳汇强度

由图7可知,不同树种日平均碳汇强度存在显著差异( $P<0.05$ ),各树种日平均碳汇量大小依次为滇朴、青冈栎、干香柏、鹅掌楸、早冬瓜、雪松,平均值分别为 $1.73$ 、 $1.44$ 、 $0.64$ 、 $0.56$ 、 $0.51$ 、 $0.33\text{ g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。对比不同树种日平均碳汇量可知,较雪松相比,滇朴日平均碳汇量比雪松高 $4.24$ 倍。综上,滇朴碳汇量最大,雪松最小。

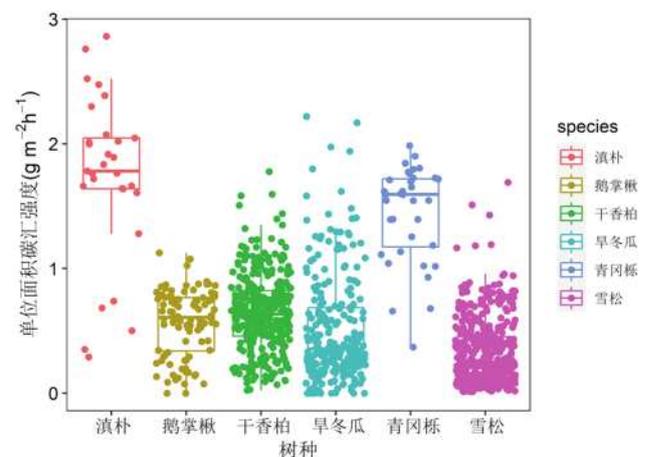


图7 不同树种单位面积碳强度

### 三、讨论

森林作为碳的源和汇,在全球气候调节中具有至关重要的作用<sup>[23]</sup>。而树干茎流是树体水分动态变化及生理

功能的重要指标,为植物的蒸腾提供水分,通过分析树干液流速率的大小,可用来表征植物的蒸腾情况<sup>[24]</sup>。同时树干茎流受树种、气象、时空分布及植物自身形态和生理生长特性等因素影响<sup>[25-29]</sup>。先前一些研究表明:杉木树干日平均茎流受气温、水汽压亏缺、土壤水分含量影响显著<sup>[30]</sup>;大兴安岭落叶松胸径大小与边材面积是影响树干茎流的主要因素<sup>[31]</sup>;树种自身生理学结构对树干液流速率影响巨大<sup>[32]</sup>。在本研究中,单株树木茎流速率与蒸腾速率成正相关关系,受位点分布、监测时间、树种类型等影响显著,且不同位点各树种日平均茎流和蒸腾速率变化趋势相一致,但数值差异较大,这可能是由不同树种自身形态结构不同造成,该结果与刘国明等<sup>[3]</sup>研究结果相吻合。

森林碳汇受气温、降水、海拔、坡度、树种及树龄等因素的交互影响<sup>[34, 35]</sup>。本研究结果表明,不同位点各树种日碳汇量随时间的推移逐渐下降,这主要是由于气温越高,饱和水汽压差越大,植物进行CO<sub>2</sub>交换越强<sup>[36]</sup>。本研究中,7-8月正值高温,此时植物光合作用和蒸腾作用强烈,吸收CO<sub>2</sub>多,而11-12月正值冬季,气温低,光照强度减弱,光合作用相对降低,吸收CO<sub>2</sub>少,因此随着时间推移,不同位点各树种日碳汇强度降低。同一树种,不同位点日碳汇量随位点海拔增高基本呈递增的趋势,如干香柏、旱冬瓜,这主要是由于随海拔上升,树种木层碳密度增加,该结果与徐少君<sup>[37]</sup>、李海涛<sup>[38]</sup>等相一致。本研究结果还表明滇朴碳汇能力最大,雪松最小,这主要是由于不同树种各器官固碳能力差异显著<sup>[39]</sup>,受叶片光合速率、叶面积指数大小的影响<sup>[40]</sup>。而滇朴属于落叶乔木,雪松属于针叶乔木,滇朴叶面积大于雪松,在同等环境下,滇朴叶片光合作用强,植株蒸腾作用大,因此固碳能力大于雪松。

#### 四、结论

1. 生长季内不同位点各树种树种日平均茎流、日蒸腾量及日碳汇量随时间推移基本呈逐渐下降的趋势。
2. 同一树种随不同位点海拔升高碳汇能力逐渐增大。
3. 不同树种茎流速率与蒸腾速率呈正相关关系,综合对比不同树种茎流速率、蒸腾速率及单位面积碳汇强度变化情况,滇朴碳汇能力最优,雪松碳汇能力最差,鹅掌楸、干香柏、旱冬瓜之间差异不显著。

#### 参考文献:

[1] Tang R, Zhao J, Liu Y, et al. Air quality and health co-benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1008.  
[2] 周国逸. 中国森林生态系统固碳现状、速率和潜

力研究[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(04): 279-281.

[3] 刘迎春, 高显连, 付超, 等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4002-4010.  
[4] 邱书志, 薄乖民, 丁骞, 等. 白龙江林区森林植被碳储量和碳汇功能研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(1): 88-93.  
[5] Richards K R, Stokes C. A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research[J]. *Climatic change*, 2004, 63(1-2): 1-48.  
[6] Kindermann G, Obersteiner M, Sohngen B, et al. Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation[J]. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 2008, 105(30): 10302-10307.  
[7] 续珊珊. 森林碳储量估算方法综述[J]. *林业调查规划*, 2014, 39(6): 28-33.  
[8] 何英. 森林固碳估算方法综述[J]. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 22-27.  
[9] 刘纪远, 于贵瑞, 王绍强, 等. 陆地生态系统碳循环及其机理研究的地球信息科学方法初探[J]. *地理研究*, 2003, 22(4): 397-405.  
[10] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.  
[11] 查同刚, 张志强, 朱金兆, 等. 森林生态系统碳蓄积与碳循环[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6): 112-119.  
[12] 孙春健, 王春林, 申双和, 等. 珠三角城市绿地CO<sub>2</sub>通量的季节特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(04): 269-278.  
[13] 魏远, 张旭东, 江泽平, 等. 湖南岳阳地区杨树人工林生态系统净碳交换季节动态研究[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(05): 656-665.  
[14] 王文杰, 于景华, 毛子军, 等. 森林生态系统CO<sub>2</sub>通量的研究方法及其研究进展[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(5): 102-107.  
[15] Smith T M, Shugart H H. The potential response of global terrestrial carbon storage to a climate change[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70: 629-642.  
[16] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2000, 04: 446-452.  
[17] 吴国训, 唐学君, 阮宏华, 等. 基于森林资源清查的江西省森林碳储量及固碳潜力研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(01): 105-110.

- [18]徐新良, 曹明奎. 森林生物量遥感估算与应用分析[J]. 地球信息科学, 2006, 8(4): 122-128.
- [19]李奇, 朱建华, 冯源, 等. 中国主要人工林碳储量与固碳能力[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(04): 1-6.
- [20]王兵, 牛香, 宋庆丰, 等. 基于全口径碳汇监测的中国森林碳中和能力分析[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 30-34.
- [21]Chen Y F, Zhang Z S, Zhang L Z., etc. Sap velocity, transpiration and water use efficiency of drip-irrigated cotton in response to chemical topping and row spacing[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 267:1-11.
- [22]Robert I K. R in action[M]. Shelter Island: Manning Publications Co, 2016.
- [23]Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [24]郭锦荣, 白天军, 邓文平, 等. 不同胸径日本柳杉树干液流及其蒸腾耗水差异[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(2): 70-77.
- [25]熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 等. 华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推[J]. 林业科学, 2008, 44(1): 34-40.
- [26]李广德, 贾黎明, 孔俊杰. 运用热技术检测树干边材液流研究进展[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(3): 94-100.
- [27]李振华, 王彦辉, 于澎涛, 等. 华北落叶松液流速率的优势度差异及其对林分蒸腾估计的影响[J]. 林业科学研究, 2015, 28(1): 8-16.
- [28]Nadezhdina N, Čermák J, Ceulemans R. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors[J]. *Tree physiology*, 2002, 22(13): 907-918.
- [29]Crosbie R S, Wilson B, Hughes J D, et al. The upscaling of transpiration from individual trees to areal transpiration in tree belts[J]. *Plant and Soil*, 2007, 297(1-2): 223-232.
- [30]刘鑫, 张金池, 汪春林, 等. 长三角地区典型树种杉木液流速率变化特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 57(02): 86.
- [31]池波, 蔡体久, 满秀玲, 等. 大兴安岭北部兴安落叶松树干液流规律及影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 21-26.
- [32]程静, 欧阳旭, 黄德卫, 等. 鼎湖山针阔叶混交林4种优势树种树干液流特征[J]. 生态学报, 2015, 12.
- [33]刘明国, 唐敬超, 王玉涛, 等. 辽西地区油松树干液流变化规律及影响因子研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(2): 175-179.
- [34]Ueyama M, Iwata H, Harazono Y. Autumn warming reduces the CO<sub>2</sub> sink of a black spruce forest in interior Alaska based on a nine-year eddy covariance measurement[J]. *Global change biology*, 2014, 20(4): 1161-1173.
- [35]赖家明, 黄从德, 胡庭兴, 等. 基于遥感信息的道孚县亚高山森林植被地上碳储量估算及其空间分布特征[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 593-597.
- [36]孙世群, 王书航, 陈月庆, 等. 安徽省乔木林固碳能力研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(7): 144-147.
- [37]兰秀, 杜虎, 宋同清, 等. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2043-2053.
- [38]徐少君, 曾波, 苏晓磊, 等. 基于RS/GIS的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2174-2184.
- [39]李海涛, 王姗姗, 高鲁鹏, 等. 赣中亚热带森林植被碳储量[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 693-704.
- [40]林玮, 白青松, 陈雪梅, 等. 华南主要造林树种碳汇能力评价体系构建及优良碳汇树种筛选[J]. 西南林业大学学报, 2020, 40(1): 28-37.
- [41]古佳玮. 森林碳汇与树种固碳能力研究进展[J]. 现代园艺, 2023, 46(1): 26-29.