

断根处理及环境因子对白玉兰全冠树木移植茎流速率的影响研究

Effects of Root Cutting Treatment and Environmental Factors on Stem Flow Rate of *Magnolia denudata* Full-crown Tree Transplantation

冯海月 张冬梅* 张敬丽 张 浪 有祥亮
FENG Haiyue ZHANG Dongmei* ZHANG Jingli ZHANG Lang YOU Xiangliang

基金项目:
上海市科委科技创新行动计划课题“上海市‘四化’生态网络空间综合评价与质量提升关键技术研究及集成示范”(编号: 19DZ1203301)
上海市科委重点研发项目“白玉兰新品种培育成套技术研发及示范应用”(编号: 20dz1203700)

文章编号: 1000-0283 (2021) 10-0094-07
DOI: 10.12193/j.laing.2021.10.0094.015
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-05-26
修回日期: 2021-06-22

冯海月
1996年生/女/云南曲靖人/云南农业大学风景园林硕士在读/研究方向为园林植物(昆明 650201)

张冬梅
1970年生/女/河南周口人/上海市园林科学规划研究院植物研究所所长, 上海城市困难绿地绿化工程技术研究中心、城市困难绿地生态园林国家林业局重点实验室教授级高级工程师/研究方向为城市园林绿化树种的选育、栽培技术研发和应用(上海 200232)

张敬丽
1975年生/女/河南开封人/云南农业大学园林园艺学院教授/研究方向为野生观赏植物资源与园林规划设计(昆明 650201)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 418517920@qq.com

摘要
采用包裹插针式FLGS-TDP茎流计, 对两种断根强度处理的白玉兰全冠树木移植后的茎流速率进行测定, 结合自动气象测定系统, 分析断根处理及环境因子对树木生长及茎流速率的影响。茎流速率日变化均呈明显昼高夜低趋势, 月变化呈现明显夏季高于秋季的趋势; 和对照相比, 白玉兰移植后树木平均茎流速率均小于同规格未移植树木; 10倍胸径断根强度苗木生长优于6倍胸径断根强度。白玉兰全冠苗移植进行10倍胸径断根强度的生长适应性更强; 气温和空气相对湿度对移植后苗木茎流速率影响最大, 移植初期对白玉兰进行水肥、遮阴管理和疏枝疏冠是保证其成活率的主要条件。

关键词
白玉兰; 全冠树木; 移植; 茎流速率; 初养护技术

Abstract
Using wrapped pin FLGS-TDP stem flow meter technology, the paper measured the stem flow rate of two magnolia full crown trees with root strength treatment after transplantation. Combined with the automatic meteorological measurement system, the research analyzed the root cut treatment and environmental factors on the tree's growth. And the influence of stem flow rate. The daily changes of sap flow rate showed a trend of day-high and night-low, and the monthly changes showed a significantly higher trend in summer than in autumn. Compared with the control, the average sap flow rate of transplanted trees was lower than that of untransplanted trees of the same size, ten times the DBH. The root breaking strength of seedlings grows better than that of 6 times the diameter at breast height. Magnolia full-crown seedlings transplanted with ten times the diameter at breast height and root breaking strength are more adaptable; temperature and relative air humidity have the most significant impact on the seedling stalk flow rate after transplantation. In the early stage of transplantation, the management of water and fertilizer, shade management, and thinning of branches and crowns of magnolia are the primary condition to ensure its survival rate.

Key words
Magnolia denudata; crown trees; transplant; sap flow velocity; primary maintenance technology

白玉兰 (*Magnolia denudata*), 木兰科 (Magnoliaceae) 木兰属落叶乔木, 是城市园林绿化的重要树种^[1]。白玉兰属深根性肉质根, 对高地下水位、高致密度以及pH值比较敏感。而上海地下水位偏高 (0.8 ~ 1.4 cm), 土层致密, pH值达0.74 ~ 0.85, 白玉兰移植成活率普遍低, 尤其是全冠树木移植。在树木移植初

期，促使根系快速恢复生长，保证须根生长量，维持根、茎、叶水平平衡是提高移植成活率的关键。显然，找出影响根系吸水与叶片蒸腾的限制因子，保持根冠水分平衡，采取相应的养护措施是保障树木移植成活的基础。

树干茎流监测是判断根系吸水状况及树木蒸腾作用强弱的重要手段，被普遍应用于树木蒸腾耗水研究^[2]。裴志永通过对不同林龄毛乌素沙地沙柳(*Salix cheilophila*)与环境关系的研究，确定沙柳在荒漠化沙地的生态种植密度及植被恢复措施^[3]；夏桂敏等对‘寒富’苹果树(*Malus pumila*)各月的茎流特征及环境因子的影响研究得出适宜的灌水时间^[4]；唐达等通过长期对荒漠灌丛的茎流特征的测定揭示水分蒸腾规律，以此制订科学灌水及高效生态管理措施^[5]。

城市绿化实践表明，在进行大树移植前的断根处理、移植后的修枝修冠、遮阴等措施，对根系恢复生长、地下水吸收、树冠水分养分供给和保持蒸腾平衡均有较大的影响^[6]。目前，树木移植后采用的初养护技术多凭实践经验，对大规格苗木移植后的生长规律研究较少，根冠平衡规律研究更少。本研究利用树木茎流监测法对白玉兰全冠树木移植后（两年内）的生长形态、生理指标及茎流速率进行测定，分析影响白玉兰生长和茎流速率的因子，旨在为白玉兰全冠苗移植后的初养护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

移植前，白玉兰全冠苗木种植于河南省南召县皇路店苗圃。2019年1月，将其种植于上海市园林科学规划研究院青松基地（31° 9′ 15″ N，121° 26′ 36″ E）。

1.2 试验材料

选取6株同等规格树木安装茎流测定仪，在圃地提前一个生长季进行10倍和6倍胸径断根处理，常规养护；同等立地下

同规格未移植树木作为对照（CK），样树的基本情况如表1。

1.3 试验方法

（1）生长指标测定。当年生枝生长量（单位：cm）：选择向阳当年新生枝条5枝测定其长度，取平均值。

（2）叶片形态指标测定。平均叶片面积大小（单位：mm²）：选取试验树木的健康成熟叶片，每树同一方向随机取叶10片，采用Yaxin-1241便携式叶面积仪测定其叶面积，并求取平均值；平均叶片厚度（单位：mm）：每星期定时采取对照和试验取一年生枝条上第4～5轮成熟叶片10片，用精度为0.01 mm的电子游标卡尺进行叶厚测量，所测厚度除以10为每片叶片的平均厚度。

（3）叶绿素生理指标测定。叶绿素相对含量：每星期定时树冠外侧正东西方向各5片，用SPAD502叶绿素仪分别测定每片叶子的上部、中部、尖部的叶绿素相对含量，最后求取平均值为所测叶片的叶绿素含量。

（4）树干茎流速率测定。采用FLGS-TDP包裹插针式植物茎流仪（美国Dynamax公司生产）指针分别插入试验树木茎干的1.3 m和2.3 m处。茎流速率的计算公式见公式（1）（2）^[7-9]：

$$K = (dT_{max} - dT) / dT \tag{1}$$

$$V = 0.0119 * K^{1.231} * 3600 \text{ (cm/h)} \tag{2}$$

式中：K为无量纲参数；dT为瞬时温差（℃）；dT_{max}为最高探针温差（℃）；V为茎流速率（cm/h）。

（5）环境因子测定。DCH20自动气象观测站测定空气温度（T）、太阳总辐射（ESR）、空气相对湿度（RH）、风速（WS）、土壤温度（ST）等气象因子。

饱和水汽压亏缺（VPD）可由气温和空气相对湿度计算得到^[7-9]，见公式（3）。

$$VPD = 0.611e \text{ (} 17.502t/t + 240.97 \text{) (} 1 - RH/100 \text{)} \tag{3}$$

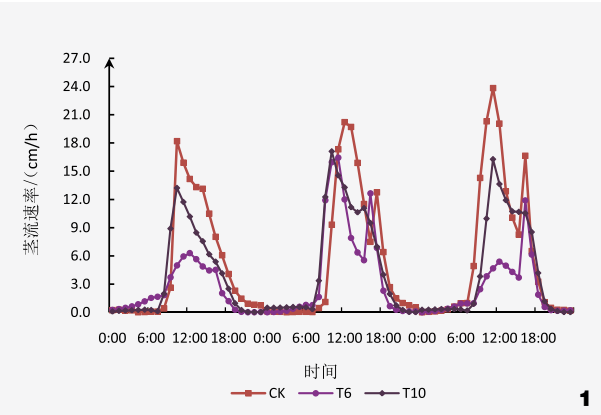
式中，t为气温；RH为空气相对湿度。

（6）数据处理。采用Excel和SPSS24.0软件进行数据处理，并绘图、制表和相关分析。

表1 试验树种基本情况表

编号	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m	断根强度/胸径的倍数
CK	10	6.5	3.5	
T6:1-3	22.8	9.0	4.1	6D
T10:4-6	22.1	8.6	3.7	10D

注：T6为6倍胸径断根强度的苗木；T10为10倍胸径断根强度的苗木。



1. 各断根处理茎流速率日变化规律

2 结果与分析

2.1 不同断根强度对白玉兰生长的影响

白玉兰全冠树木移植后，生长及叶片形态指标均受到一定抑制作用，均小于对照树种（表2）；不同断根强度处理间树木生长差异显著，10D断根强度的当年生枝条生长量、平均叶片面积均大于6D断根强度。与对照相比，6D断根强度下，当年生枝条生长量降低45.7%，平均叶片面积降低47.6%，叶片厚度下降5.4%；10D断根强度下，当年生枝条生长量下降13%，平均叶片面积下降45.2%，叶片厚度下降10%；10D断根强度树木当年生枝条生长量和平均叶片面积分别是6D断根强度的1.6倍和1倍。

表2 各断根处理后树木的生长变化

编号	断根强度（胸径的倍数）	当年生枝条生长量/cm	平均叶片面积/cm²	平均叶片厚度/mm
CK		23Aa	90.1722Aa	0.2881Aa
T6	6D	12.5Aa	47.2772Bb	0.2926Aa
T10	10D	20Aa	49.4578Aa	0.2688Aa

注：大写字母代表极显著性差异（ $P<0.01$ ），小写字母代表显著性差异（ $P<0.05$ ）。

表3 各断根处理后树木的生理指标变化

编号	断根强度（胸径的倍数）	叶绿素相对含量
CK		44.2178ab
T6	6D	40.4533Ab
T10	10D	45.6944Aa

注：大写字母代表极显著性差异（ $P<0.01$ ），小写字母代表显著性差异（ $P<0.05$ ）。

2.2 不同断根强度对白玉兰叶绿素含量的影响

与对照树木相比，移植后白玉兰叶绿素相对含量没有明显差异。但不同断根强度处理的树木间差异显著，6D断根强度树木叶片叶绿素含量降低8.5%，10D断根强度则增加3.3%；10D断根强度是6D断根强度的1.1倍（表3）。

2.3 不同断根强度处理对移植后白玉兰茎流速率的影响

2.3.1 日变化

移植苗和对照树木日茎流速率均表现为明显的单峰和双峰现象^[10]，呈典型的时昼变化（图1）。早晨7:00—8:00茎流速率值均较低，11:00—12:00达到峰值，维持3~4h后迅速下降，在晚上19:00左右达最低值，夜间继续保持最低值。

与对照相比，移植后白玉兰的日平均茎流值和峰值差异较大。断根处理的日平均茎流速率和峰值均呈下降趋势，与孙守家研究一致^[10]。但10D断根强度处理受影响程度较小。6D断根强度平均速率为3.296 cm/h，比对照下降42.5%。茎流最大值为16.448 cm/h，比对照下降31%；10D断根强度为4.702 cm/h，比对照下降17.9%。茎流最大值为17.105 cm/h，比对照下降28.2%；10D断根强度树木的平均茎流速率和峰值分别为6D断根强度的1.43倍和1.04倍，蒸腾作用较稳定。

2.3.2 月变化

移植苗和对照树木月茎流速率均表现为季节性趋势（图2）。时间变化相比，夏季树干茎流7月、8月平均每日早晨

7:00—8:00 开始启动, 11:00—12:00 达到最大值, 19:00—20:00 茎流结束。启动和最大值时间比秋季 (9、10月) 早1.5h左右, 结束时间比秋季晚1h; 茎流速率相比, 月平均茎流速率和峰值均为夏季高于秋季, 即8月>7月>6月>9月>10月。

与对照相比, 断根处理后月平均茎流速率和峰值均小于对照, 但总体均表现平均茎流速率和峰值在8月份达到最大。以8月为例, 6D断根强度的平均茎流速率和峰值分别比对照低45.7%、48.1%, 10D断根强度低17.4%、44.5%; 10D断根强度处理受抑制程度较小, 平均茎流值和峰值都大于6D断根强度, 分别为6D的1.02倍和1.6倍。说明在同等环境下6D断根强度的蒸腾作用受抑制较大, 表现出明显下降趋势。

2.4 环境因子对移植后白玉兰茎流速率的影响

2.4.1 温度对茎流速率的影响

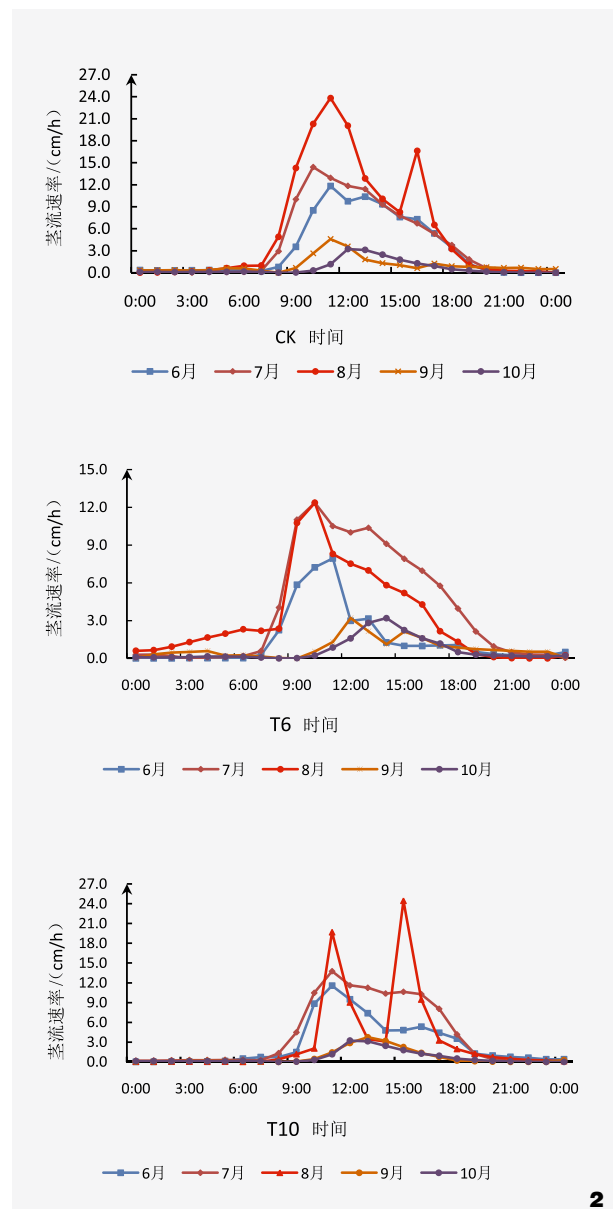
气温与移栽苗和对照茎流曲线的变化一致, 茎流达到最大值的时间早于气温2h, 这与裴志永对沙柳茎流的研究一致^[11]。但茎流速率均受到明显的抑制 (图3-a), 当气温超过30℃时, 6D断根强度受抑制程度大于10D断根强度, 是10D的1.4倍。故6D断根强度对气温的反映可进行持水量80%程度水肥管理, 10D断根强度70%程度水肥管理。

2.4.2 太阳辐射对茎流速率的影响

太阳辐射强度对移栽苗和对照茎流速率的影响为茎流速率出现峰值的时间较太阳辐射晚1h, 出现此现象的原因可能是太阳辐射强度的瞬时变化强度大于叶片的蒸腾强度变化^[10]。但曲线的波动呈一致性, 当辐射强度>250 Kpa时, 茎流速率则与辐射一同迅速上升, 当下降到250 Kpa时, 速率也同步下降。不同断根强度受影响差异明显, 当太阳辐射强度最大变化幅度超过60%时, 6D断根强度对于辐射的强度变化不敏感, 10D断根强度接近对照, 较为活跃 (图3-b), 说明6D断根强度对于环境的变化生理反应的变化较弱。故为避免过强太阳直射, 当辐射强度超过250±100KPa, 6D断根强度可进行70%程度遮阴; 当辐射强度超过300±150KPa, 10D断根强度进行60%程度遮阴。

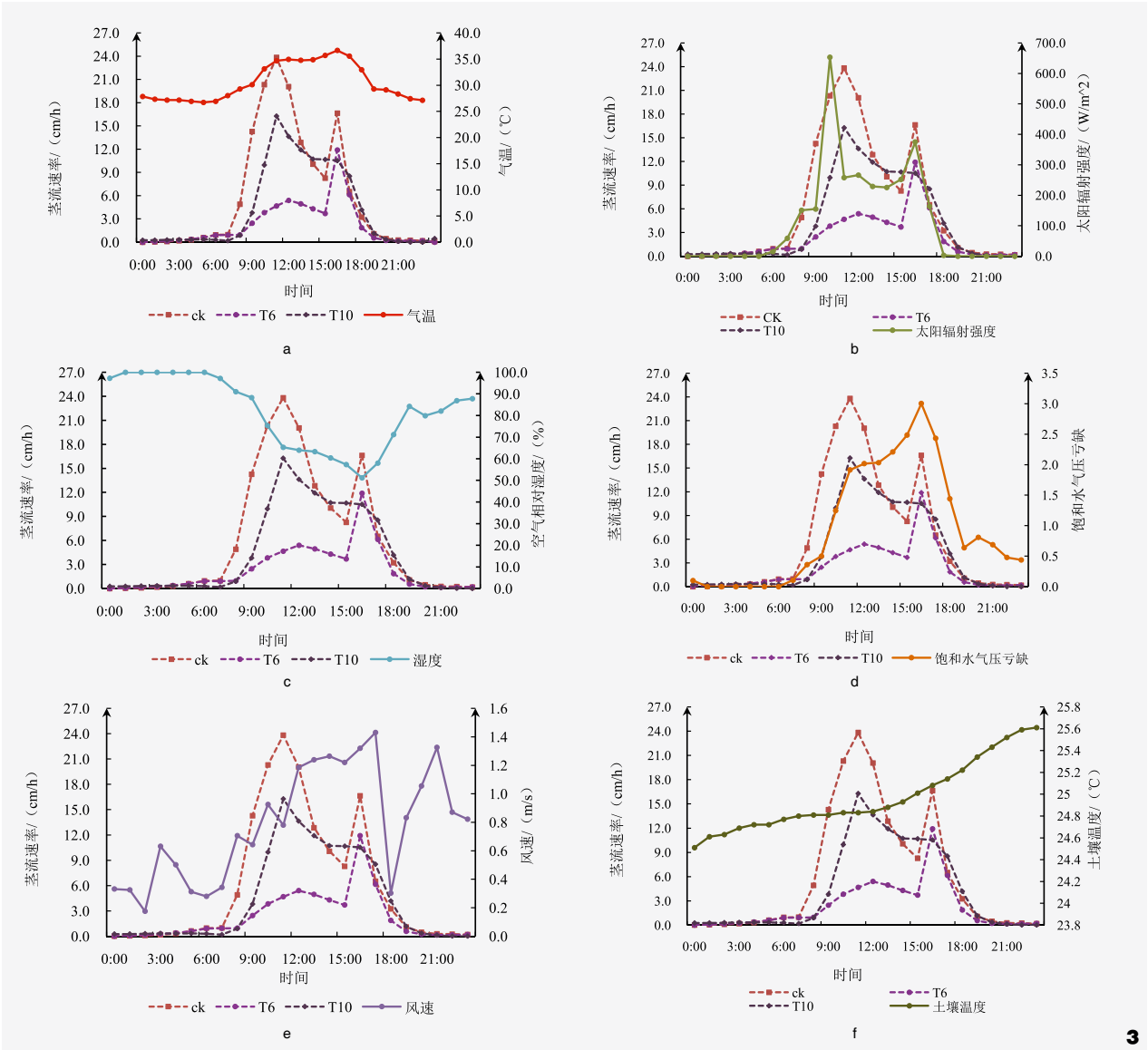
2.4.3 空气湿度对茎流速率的影响

空气湿度对茎流的影响主要表现为树木的叶片水分保持程度。空气相对湿度与移栽苗和对照茎流速率趋势相反, 但茎



2 各断根处理茎流速率月变化规律

流速率的波谷与湿度最大值呈同步性 (图3-c)。空气湿度低于65±5%时, 6D断根强度树木叶片与外界的水势压最大, 蒸腾胁迫最强, 10D断根强度次之。故上述气温影响程度进行喷淋或疏枝疏冠处理, 6D断根强度采取2/3强度疏枝疏冠, 增强蒸腾; 10D断根强度采取1/3强度疏枝疏冠, 降低蒸腾。



3

3. 各环境因子与茎流速率的关系

2.4.4 其他环境因子对茎流速率的影响

饱和水汽压亏缺对于移栽苗和对照茎流速率的影响主要取决于气温和湿度的共同作用，与气温表现出一致性。饱和水汽压增大，移栽苗和对照蒸腾作用加强，茎流速率也相应增

大^[12] (图3-d)。

另外，风速也是影响树木茎流速率的因素之一，叶片借助风力将树木的水分带走从而影响树木的蒸腾作用。茹桃勤等表明风速会使得水汽蒸发加快，当风速较快时，茎流速率会随着风速的增加而增加。但出现极大风的时候反而会降低

表4 茎流速率与气象因子的相关性关系矩阵

编号	气温	空气相对湿度	饱和水汽压亏缺	太阳辐射强度	风速	土壤温度
T6	0.546**	-0.619**	0.578**	0.577**	0.288**	-0.078
T10	0.703**	-0.778**	0.760**	0.787**	0.568**	-0.108

注：**在0.01级别（双尾），相关性显著；*在0.05级别（双尾），相关性显著。

茎流速率^[3]。图3-e反映出下午和晚上的风速较大，与树干茎流速率存在一定的联系，但影响程度不显著，待进一步研究。土壤温度影响着树木根系水分的运输进而影响树木蒸腾。土壤温度的变化主要取决于当天辐射和温度的高低变化。图3-f中，土壤温度与茎流速率变化不显著，但可看出速率的变化与土温为相反趋势。当气温和辐射强度最大时，土壤温度均超过25℃，故为避免土温的升高影响树木的根系保水可进行一定的覆盖措施，覆盖度可参照辐射的强度进行。

2.5 影响移植后白玉兰茎流速率因子主成分分析

2.5.1 不同断根强度处理移植后茎流速率与环境因子的相关性

为进一步分析各断根强度及环境因子对白玉兰茎流速率的影响程度，对不同断根强度下茎流速率与太阳辐射、空气温度、相对湿度、水汽压差和风速等环境因子在小时尺度上的观测数据进行相关性分析，结果如表4所示。气温、太阳总辐射强度、饱和水汽压亏缺、风速与白玉兰苗木移植前后的茎流速率呈正相关；空气相对湿度和土壤温度表现出负相关。

不同断根强度下环境因子对茎流速率的影响程度不同。对6D断根强度茎流速率的影响大小为空气相对湿度>太阳辐射强度>饱和水汽压亏缺>气温>风速>土壤温度，相关性最强为空气相对湿度RH达到0.619；对10D断根强度茎流速率的影响大小为太阳辐射强度>空气相对湿度>饱和水汽压亏缺>气温>风速>土壤温度，相关性最强为太阳辐射强度ESR和空气相对湿度达到了0.787和0.778。10D断根强度茎流速率对于环境因子的响应程度大于6D断根强度，表现出较好的环境适应能力。

2.5.2 移植后影响茎流速率环境因子主成分分析

影响白玉兰茎流的环境因子并不是独立的，而是相互影响共同拮抗的作用^[15]，对其影响白玉兰茎流速率的因子主成分分析，结果如表5、6所示。

根据相关性的因子利用主成分分析，公因子方差显示，

除风速和太阳辐射强度的变量共同度在70%以下，其他环境因子均在90%以上，说明提取的主成分对原始变量的解释程度较高。另外主成分特征向量及累积贡献值中，变量1、2的特征值均大于1，且2个主成分的方差贡献率分别为69.834%、20.816%，累积方差贡献率为90.650%，即可采用气温和空气相对湿度来解释全部变量的大部分信息。且气温和空气相对湿度对茎流速率的贡献率最高，故对于移栽树木的初养护可侧重于这两个因子的影响程度进行，其次是太阳辐射。

3 讨论与结论

城市园林绿化中，树木移植成活率与移植苗木的质量及移栽环境有很大关系，尤其在苗木储备期对苗木的断根强度和移植后的初养护方式，直接影响到苗木移植成活率。不同

表5 公因子方差

变量成分	初始	提取
气温	1.000	0.953
空气相对湿度	1.000	0.923
饱和水汽压亏缺	1.000	0.948
风速	1.000	0.688
太阳辐射强度	1.000	0.668
土壤温度	1.000	0.959

表6 主成分特征向量及累积贡献

变量	成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	气温	4.190	69.834	69.834
2	空气相对湿度	1.249	20.816	90.650
3	饱和水汽压亏缺	0.348	5.794	96.444
4	太阳辐射强度	0.201	3.355	99.799
5	土壤温度	0.010	0.173	99.972
6	风速	0.002	0.028	100.000

强度的断根处理移植苗生长存在明显变化。苗木移植后根系均存在一定的恢复生长期,一般白玉兰的根系恢复至少需要一年,甚至更长。而T10移栽后的生长形态指标明显比T6大,且与对照的差距较小,呈现较好的生长量。这可能源于在6D断根强度后白玉兰全冠苗遗留的根系较少,在移栽后受损的根系很难在土壤中快速恢复,故表现为通过降低生长量来维持自身养分的平衡^[14]。

移植后树木生理水分平衡是衡量树木生长好坏的重要因素之一,树木茎流不仅受自身断根强度影响,还与环境因子共同影响有关。结果表明:T10和T6苗木移植后茎流速率均受到明显胁迫作用,表现出6D断根强度影响较大。断根强度决定了树木对水分的吸收,较大强度的断根对处于深根性的白玉兰全冠苗损伤严重,主根及侧根的减少影响了对地下水分及营养物质的吸收,造成树体上部不能及时满足自身的水分平衡而降低蒸腾^[14,16-17]。而10D断根强度与未移栽树木茎流相差较小,蒸腾作用较为稳定促使树木整体生长较好,其原因主要是80%根系分布在距离树10倍胸径范围内,10倍胸径断根的强度保证了大量的根系在土壤中,使其根系的吸水和保水能力更强。

环境因子日均温、太阳辐射强度、饱和水汽压亏缺对白玉兰全冠移植苗和对照的日茎流速率影响为明显的昼高夜低趋势^[11];空气湿度对其影响相反。环境因子对茎流速率的影响在夜间无差异,白天则均受不同程度抑制而差异性显著。移植苗和对照树木的蒸腾均出现“午休”现象,这与张小由的研究结果一致^[2,11]。6D断根强度和10D断根强度苗木茎流速率分别超过10.67 cm/h、5.388 cm/h时表现出不同程度的失水现象,树木为适应环境的胁迫出现蒸腾作用急剧加强。6D断根强度失水程度大于10D断根强度,因此可根据环境因子的胁迫强度采取相应措施来降低蒸腾作用。

对极端环境胁迫的反应对比,T10适应环境的能力依然比T6较高。空气相对湿度和气温对树木茎流速率的贡献程度最大。这主要是因为光照作用强度影响着气温高低和空气的干燥程度进而影响着树木叶片气孔导度及根冠对水分平衡的转化。当气温和湿度分别为30℃、65%在5%个差值水平上,6D断根强度茎流速率受环境抑制比10倍大。加之T6本身茎流较小,树干消耗的水分增加,对于移植苗木来说,树木的胁迫

蒸腾导致水分失衡。故对保证断根移栽的成活进行初养护可根据受环境胁迫的程度。对气温的反应为水分是否运输转化,可进行水肥或遮阴养护。对空气湿度反应主要为缺水,可进行水肥管理或疏枝疏冠处理。

参考文献

- [1] 尹丽娟,张浪,张冬梅.白玉兰新品种培育研究进展[J].园林,2020(05): 7-11.
- [2] 张小由,龚家栋,周茂先,等.应用热脉冲技术对胡杨和柽柳树干液流的研究[J].冰川冻土,2003(05): 585-590.
- [3] 郝少荣,裴志永,段广东,等.不同时间尺度下环境因子与沙柳茎流关系的差异研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(03): 152-158.
- [4] 夏桂敏,孙媛媛,王玮志,等.‘寒富’苹果树茎流特征及其对环境因子的响应[J].中国农业科学,2019,52(04): 701-714.
- [5] 唐达,王辉,张谭,等.柴达木盆地沙棘茎流速率与环境因子的关系[J].干旱区研究,2017,34(03): 630-637.
- [6] 姜栋栋.白桦移植中根冠平衡修剪技术研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [7] 岳广阳,张铜会,刘新平,等.热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J].林业科学,2006,42(8): 102-107.
- [8] GRANIER A. Evaluation of Transpiration in a Douglas-fir Stand by Means of Sap Flow Measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [9] 王力,王艳萍.黄土塬区苹果树干液流特征[J].农业机械学报,2013,44(10): 152-158.
- [10] 高强,孙守家.玉兰蒸腾规律及移植过程中茎流变化研究[J].西南林学院学报,2007(05): 25-29.
- [11] 裴志永,郝少荣,乔敬伟,等.毛乌素沙地沙柳枝条茎流特征[J].生态环境学报,2019,28(01): 48-56.
- [12] 孙慧珍.东北东部山区主要树种树干液流动态及与环境因子关系[D].哈尔滨:东北林业大学,2002.
- [13] 茹桃勤,李吉跃,孔令省,等.刺槐耗水研究进展[J].水土保持研究,2005(02): 135-140.
- [14] 薄一宽.油松、樟子松与白杆大树移植中光合与蒸腾变化及其移植保活技术研究[D].内蒙古:内蒙古农业大学,2012.
- [15] 张大龙,张中典,李建明.环境因子对温室甜瓜蒸腾的驱动和调控效应研究[J].农业机械学报,2015,46(11): 137-144.
- [16] 孙守家,丛日晨,张宝鑫,等.断根程度、时间以及抑制蒸腾措施对银杏树体水分状况的影响[J].园林科技,2007(03): 15-19.
- [17] 刘建凤.玉兰大树移栽技术[J].现代农业科技,2011(05): 226.