

DOI:10.11784/tdxbz202411025

海棠叶脉网络结构及其输水特性研究

魏衍举¹, 崔旺¹, 杨亚晶^{2,3}, 周子杰¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049; 2. 西安交通大学航天学院, 西安 710049,
3. 西安交通大学复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 西安 710049)

摘要: 叶脉在植物与外界环境之间的物质和能量交换中发挥着至关重要的作用, 叶脉输运网络不仅有极高的效率, 而且具有均匀化运输的特点. 在换热器、燃料电池等装置的流道设计中, 依据叶脉结构进行仿生学设计, 可以有效提高流道网络的效率和均匀性. 为此, 需要对叶脉的结构特点、生长过程和水分在其中的流动过程与规律建立准确的认识. 本文以海棠叶片为研究对象, 对其叶脉结构、形状特性及叶脉内水分输运的流动特性进行了研究. 测量各级叶脉长度、直径及各级分支间距和夹角等参数, 并进行统计学分析, 总结叶脉网络的结构特征; 使用荧光染料处理叶脉, 观察水在各级叶脉中的运输过程. 结果表明: 海棠叶片的中脉可近似看作一细长圆锥体, 其基部直径约为 1.18 mm, 且不随叶片生长而加粗; 次脉的长度和基部直径分别与其基部距离叶基的距离呈线性负相关, 基部直径仅在叶片生长的前半阶段有所加粗, 次脉的分支角、同侧前间距与其基部距离叶基的距离之间也存在一定关系; 中脉及次脉中某一点处的水分流速与该点距离该条叶脉基部的距离呈线性负相关, 该线性关系的斜率在同一叶片上的不同叶脉间基本相等; 中脉及次脉中的水分输运具有同步性, 微脉中的水分运输则表现出不同于中脉、次脉的分级性.

关键词: 叶脉; 结构参数; 水分运输; 结构优化

中图分类号: TK46

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)02-0193-10

Network Structure and Water Transport Characteristics in Begonia Leaf Vein

Wei Yanju¹, Cui Wang¹, Yang Yajing^{2,3}, Zhou Zijie¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Key Laboratory for Strength
and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Leaf veins are vital for the exchange of matter and energy between plants and the environment. The leaf vein transport network is not only extremely efficient but also has the characteristics of homogeneous transportation. While designing the flow channels of heat exchangers, fuel cells and other devices, a biomimetic design based on the leaf vein structure can effectively improve the efficiency and uniformity of the flow channel network. Therefore, it is necessary to understand the structural characteristics, growth and flow processes and law of leaf veins. This paper studied the structure and shape characteristics of leaf veins and the flow characteristics of water transport within them. Parameters such as the length and diameter of the veins and the spacing and angles of their branches at all levels were measured. Statistical analysis summarized the structural characteristics of the leaf vein network. Fluorescent dyes were used to observe water transport through the veins at all levels. The results show that the midvein of the begonia leaf can be regarded as an elongated cone, with a diameter of approximately 1.18 mm at the base, which do not thicken with leaf growth. The length and diameter of the secondary vein are linearly negatively correlated with the base leaf base distance, respectively, and the base only thickened during the first half of leaf growth. There is also a relation-

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2025-01-15.

作者简介: 魏衍举 (1982—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 杨亚晶, yjyang@mail.xjtu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52176128); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2024JC-YBMS-312).

Supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 52176128), the Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program (No. 2024JC-YBMS-312).

ship between the branch angle of the secondary vein, the anterior distance of the ipsilateral vein and the distance from the leaf base. The water flow velocity at a point in the midvein and secondary vein is linearly negatively correlated with the distance between the point and the vein base, and the linear relationship slope is similar between the various veins on the same leaf. The water transport in the midvein and the secondary vein is synchronous, while that in the microvein varied from the midvein and secondary veins.

Keywords: leaf vein; structural parameter; water transport; structural optimization

叶片是植物光合作用、蒸腾作用的主要场所,也是植物呼吸作用的重要场所之一. 叶脉在植物内部的物质和能量交换中起着至关重要的作用^[1-2]. 经过数亿年的演化,叶脉形成了高效的物质输运网络,且具有均匀化输运的特点,即叶片各处获取的水分、无机盐和其他营养物质是均匀的;此外,许多植物的叶脉末端相互连接,形成闭合网络,具有可在网络局部断裂或堵塞的情况下保证下游物质能量供应等诸多优点^[3-6]. 与之相比,散热器、均温板、燃料电池双极板等传统物质或能量交换装置的流道,不仅效率存在进一步优化空间,而且其末端往往因浓度差、温度差的下降而导致交换能力下降,常见的无闭合回路的开放结构也难以应对局部断裂和堵塞^[7].

因此,在上述装置的流道设计中,依据叶脉结构进行仿生学设计,可以有效提高流道网络的效率和均匀性. 房栋^[8]设计的仿荷叶叶脉微流道散热器相比传统流道,显示出更低的峰值温度和更好的温度均匀性,特别是在热源功率增加时更为明显. 张员等^[9]设计的 3 种仿生叶脉流道冷液板中,Ⅲ型冷液板显著改善了温度均匀性. 汪维伟等^[10]研究的 Y 型树状分叉结构在不同流速下展现出优越的传热性能. 李志强等^[11]的研究则表明,仿生叶脉液冷板的冷却性能明显优于传统蛇形冷板,且随着分支角度和入口流量的增加,冷却效果更佳.

缪沁玥等^[12]研究了石楠的叶脉结构参数与叶面积的关系,发现叶面积与叶脉总面积和总长度呈正比. 刘梦茜^[13]分析了 9 种木兰科植物的叶片,结果显示中脉长度和密度与叶面积呈显著异速生长关系. 吴一苓等^[14]指出,细小的叶脉负责水分输运,水分输运能力取决于小叶脉的密度. 荧光染料是植物生理研究的有效示踪剂,尤其是在植物叶片中水分输运的可视化中得到了广泛应用^[15-17]. Salleo 等^[18]利用荧光染料观察桂樱和胡桃主脉中水分渗漏方向. 在荧光染料示踪的基础上, Liu 等^[19]提出了一种基于图像处理的算法,通过自动识别荧光染料并计算流速,定量描述叶脉系统的水分输运规律.

之前的研究主要以叶脉结构、形状特性或叶脉内水分运输为主,缺乏对叶脉的结构特点和水分在其中

流动规律的整体性研究,对叶脉的结构特点、生长过程和水分在其中的流动过程与规律建立准确的认识对提高叶脉仿生结构的性能有极其重要的意义. 因此,为了更好地提升仿生叶脉结构的性能,需要从仿生应用角度对叶脉结构及水运输特性进行整体研究.

海棠具有出色的抗旱、抗寒、抗涝、抗盐碱等能力,同时对贫瘠土壤和水湿环境有强大的耐受力,移栽成活率高,能够适应各类土壤,生命力旺盛,而这与海棠叶片高效营养运输能力紧密相关. 本文以海棠叶片为研究对象,研究其叶脉的结构、形状特性及叶脉内水分运输的流动特性,该研究对散热器、均温板、燃料电池双极板等传统物质或能量交换装置的流道机械结构优化具有重要价值.

1 实验方法

1.1 叶脉网络结构参数特性的研究方法

本研究中所用实验材料为生长健康的海棠树树冠外层叶片,并对采集的叶片进行指标测量,包括不同大小的叶片的叶长 L 、叶宽 W 、叶面积 S , 中脉的长度 L_m 和基部直径 D_b , 以及各次脉基部到叶基的长度 x 、长度 l 、分支角 θ 、同侧前间距 ΔL 、基部直径 d_b 、前中脉直径 D_{pre} 和后中脉直径 D_{past} 等. 对于次脉分支角 θ 、同侧前间距 ΔL 、前中脉直径 D_{pre} 和后中脉直径 D_{past} 的定义如图 1 所示. 指标的定义如表 1 所示. 中脉是叶片上最粗的、直接与叶柄相连的叶脉,是整个叶脉网络的主干;次脉是从一级脉发源、略细于一级脉的叶脉;微脉指发源于二级脉、密集分布于二级脉之间的较细的叶脉,往往呈明显的网状结构. 对测得的次脉基部到叶基的长度、同侧前间距、基部直径、前中脉直径和后中脉直径做归一化处理,统一除以其

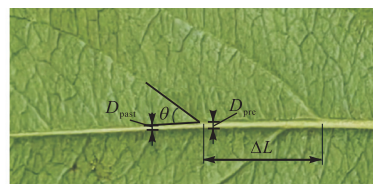


图 1 叶片相关概念示意

Fig.1 Leaf related concept diagram

表 1 叶片及叶脉网络结构参数的定义

Tab.1 Definitions of the leaf and vein network structure parameters

参数	定义
L	从叶基到叶尖的长度
W	垂直于叶长的最宽处的长度
S	叶片的投影面积
L_m	中脉长度
D_b	中脉在叶基处的直径
x	次脉基部到叶基的长度
l	次脉基部到末端的长度
θ	次脉基部与中脉的夹角
ΔL	次脉基部到中脉同一侧更靠近叶基的相邻次脉基部的长度
d_b	次脉基部的直径
D_{pre}	次脉从中脉分支处的中脉分支前的直径
D_{past}	次脉从中脉分支处的中脉分支后的直径

所属叶片的叶长,得到相应的归一化值,即

$$\tilde{a} = \frac{a}{L} \tag{1}$$

式中 a 代表 x 、 l 、 θ 、 ΔL 、 d_b 、 D_{pre} 、 D_{past} 。

1.2 叶脉网络水分运输特性的研究方法

为实现对叶脉网络水分运输的观测,需要将叶脉水分运输过程可视化,首先将叶片背面朝上固定在黑色纸板上,再将其盖在盛有饱和罗丹明荧光染料溶液的培养皿上,叶柄穿过纸板浸没到荧光染料中,最后用紫外线灯照射叶片,流入叶脉的荧光染料溶液在紫外线照射下发出绿色荧光即可显示水分到达的位置。此外需要注意的是,应调整紫外线灯的角度确保照射区域及叶片的中心基本重合,叶片各处所受的光照基本一致,避免不同强度的紫外线影响叶片气孔开闭,对叶片局部的水分输运造成干扰。同时,紫外线灯应尽可能远离叶片,以减少叶片局部不平整造成的阴影,降低灯光的热量对叶片活性的损伤。考虑到叶脉的分支结构以及叶脉横截面积对流量分配的影响,选取生长状况相似、同一品种的海棠叶片,保证不同实验组之间叶片的结构特征基本相似,减小因材料本身差异导致的实验误差。

观测水分的运输过程时使用手机的延时摄影功能并录像,在摄像头前固定绿色激光镜片以过滤叶片反射的大量紫光,调节相机的感光度、快门速度、抽帧时间等参数至合适范围后开始拍摄,直至整个叶脉网络基本被荧光溶液充满时停止拍摄。视频录制完成后,使用视频编辑软件 Pr 对视频做初步处理,提高画面对比度、饱和度、高光亮度,降低画面阴影亮度等,减少叶肉和背景的干扰,使视频画面中的叶脉荧光更加突出。视频的最终效果如图 2 所示。微脉水分运输观测采用相同的方法,对 3 片长度依次为 93 mm、70 mm、30 mm 的叶片使用显微镜观测并用

电脑录像。

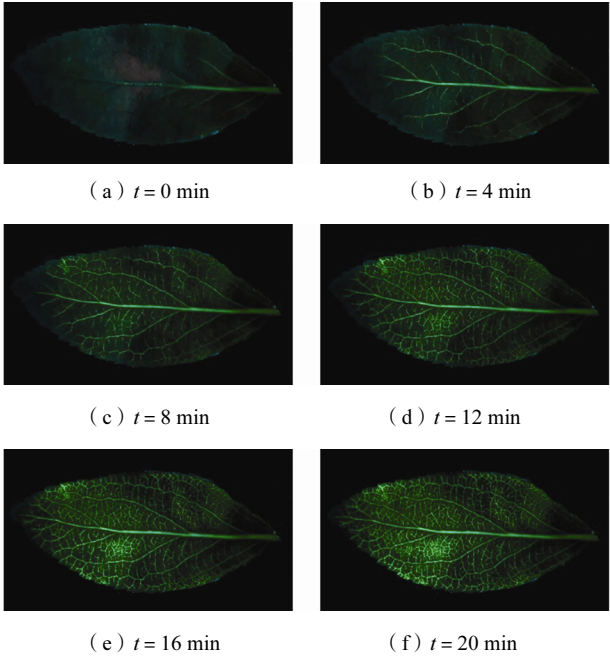


图 2 叶片叶脉网络中水分的流动图像
Fig.2 Images of the water flowing through the leaf vein network

使用 MATLAB 软件的 Image Processing Tool 工具包,对获得的视频每一帧依次提取为图片后进行二值化和骨架化处理,不同时间点处已有荧光溶液流过的叶脉网络的骨架化图像,如图 3 所示。在上述骨架

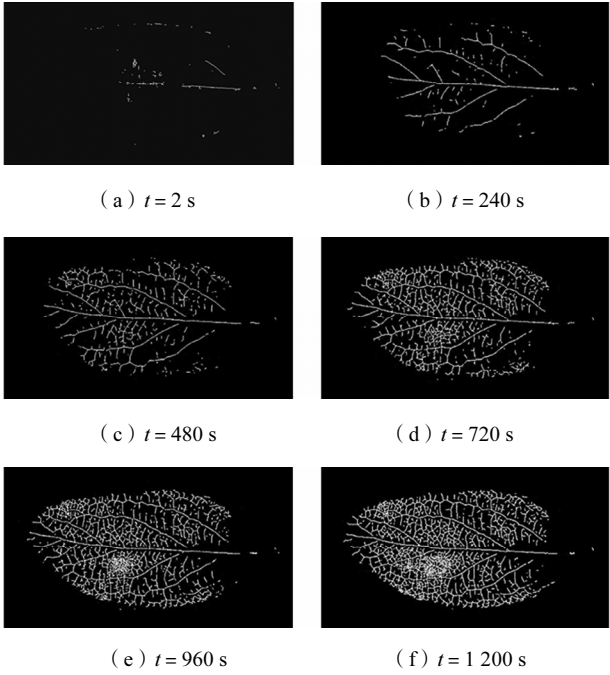


图 3 不同时间点处已有荧光溶液流过的叶脉网络的骨架化图像
Fig.3 Skeletonized images of the leaf vein network at different time points through which a fluorescent solution flowed

化图像中,每隔 15 帧(30 s)取一帧,用 ImageJ 软件测量该帧中荧光溶液在中脉上流过的距离 l_g 及在 3 条所选次脉上流过的距离 l_{g1} 、 l_{g2} 和 l_{g3} ,并利用 MATLAB 软件的 smooth 函数将上述 4 组数据平滑化,得到 l_g 、 l_{g1} 、 l_{g2} 和 l_{g3} 随时间的变化情况,由此可以确定每一个时刻叶脉内荧光溶液的流速.微脉中水分运输速度的观测采用上述相同的方法.

对获得的微脉水分运输视频,分别使用 MATLAB 软件的 Image Processing Tool 工具包,对视频的每一帧依次提取为图片并编号,依次进行二值化,调节二值化阈值,直至荧光溶液流过的区域全部变为白色,其余区域全部变为黑色,最终所取阈值为 0.11. 用 MATLAB 计算白色区域占全图面积的百分比,即微脉中荧光溶液对叶面的覆盖率,从而得到荧光溶液的覆盖率随时间的变化情况.

2 结果与讨论

2.1 叶脉网络结构参数特性

2.1.1 叶片尺寸与中脉尺寸参数的关系

海棠叶片中脉基部直径与叶长的关系如图 4 所示,其直径松散分布在 1.20 mm 左右,二者之间基本不存在相关关系.因此,可以认为海棠叶片的中脉基部直径在叶片发育的最开始阶段即固定下来,基本不随叶片的生长发生变化.这一点可以通过中脉锥度与叶长的关系加以验证.

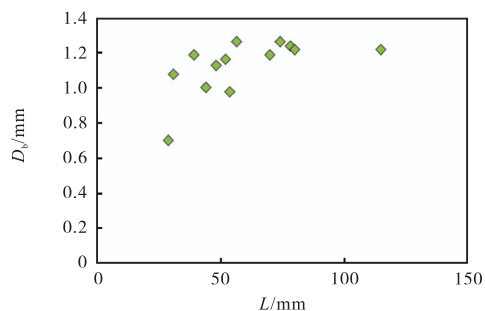


图 4 中脉基部直径与叶长的关系

Fig.4 Relationship between the diameter of the midvein base and the leaf length

叶片中脉锥度的倒数与叶长的关系如图 5 所示,二者线性拟合 $R^2 = 0.9900$,存在极显著的线性相关关系.其中,中脉锥度

$$C = \frac{D_b}{L} \quad (2)$$

将测量统计所得中脉锥度表达式与式(1)对比,可知海棠中脉锥度仅取决于叶长,中脉基部直径可近似视为常数 1.18 mm.中脉可近似看作一均匀收缩的圆锥

体,只做整体轴向伸长,而不做整体周向加粗.

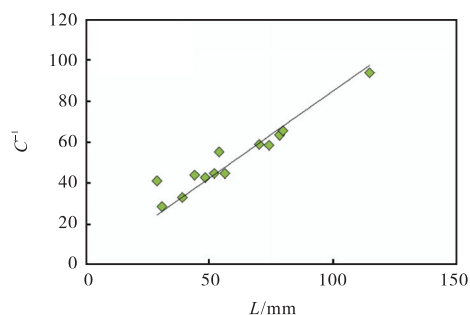


图 5 中脉锥度的倒数与叶长的关系

Fig.5 Relationship between the reciprocal of the midvein taper and leaf length

2.1.2 次脉结构参数与 $\tilde{x}$ 的关系

次脉分支角与 $\tilde{x}$ 的关系如图 6 所示.可见大、中、小 3 类叶片的次脉分支角随 $\tilde{x}$ 的变化规律基本一致: θ - $\tilde{x}$ 曲线呈 N 形走向,叶片基部、尖部的次脉越靠近则叶尖则分支角越大,中部的次脉越靠近则叶尖分支角越小;位于叶片中部偏下处、叶尖处的次脉分支角最大,位于叶片中部偏上处、叶基处的次脉分支角最小.不同大小叶片的次脉分支角也存在一定差异, $L = 50$ mm 的叶片次脉分支角最小, $L = 30$ mm 的叶片的次脉分支角居中, $L = 100$ mm 的叶片则有最大的次脉分支角.

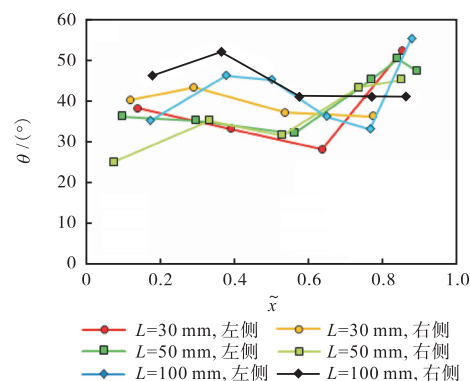


图 6 次脉分支角与 $\tilde{x}$ 的关系

Fig.6 Relationship between the secondary vein branch angle and $\tilde{x}$

次脉分支角与 $\tilde{x}$ 的关系和叶片的生长过程有关.叶片的生长发育过程可分为顶端生长、边缘生长、居间生长和组织发育成熟 4 个阶段.顶端生长期间,叶片尖部细胞分裂、生长较为活跃,尖部次脉靠近叶尖的一侧生长速度高于远离叶尖的一侧,两侧的生长速度差形成的、方向由靠近叶尖一侧指向远离叶尖一侧的合推力迫使次脉分支角张大;越靠近叶尖的次脉,受到这一推力影响的时间也越长,最终形成的分支角也越大.同理,成熟阶段期间,由于更靠近叶

片基部的组织停止生长更晚,基部次脉远离叶基的一侧生长速度低于靠近叶基的一侧,两侧生长的速度差形成的、方向由靠近叶基一侧指向远离叶基一侧的合推力迫使次脉分支角缩小;越靠近叶基的次脉,受到这一推力影响的时间也越长,最终形成的分支角也越小。

考虑到次脉生长的空间可能同时受到叶长、叶宽、分支角的限制,对次脉的长度尝试了多种不同的归一化方法。最终结果显示,采用叶长-叶宽归一化,即以叶长、叶宽的平方和的平方根为分母对次脉长度作归一化时,各数据点分布最集中, R^2 达到最大值 0.8500,归一化效果最好,如图 7 所示,这表明次脉的长度受叶长的影响最大。同时,不同归一化方法下次脉长度随 $\tilde{x}$ 的变化呈基本一致的线性下降趋势,线性拟合 R^2 最大可达 0.8500,可以认为次脉长度与 $\tilde{x}$ 之间存在线性负相关关系。以归一化效果最好的叶长-叶宽归一化进行描述,即

$$\hat{l} = \frac{l}{\sqrt{L^2 + W^2}} = -0.46\tilde{x} + 0.48 \quad (3)$$

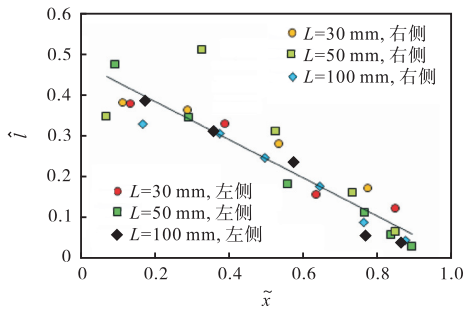


图 7 次脉长度与 $\tilde{x}$ 的关系

Fig.7 Relationship between the secondary vein length and $\tilde{x}$

次脉同侧前间距 ΔT 与 $\tilde{x}$ 的关系如图 8 所示。对同侧前间距和 $\tilde{x}$ 同时作归一化处理,3 片叶片的数

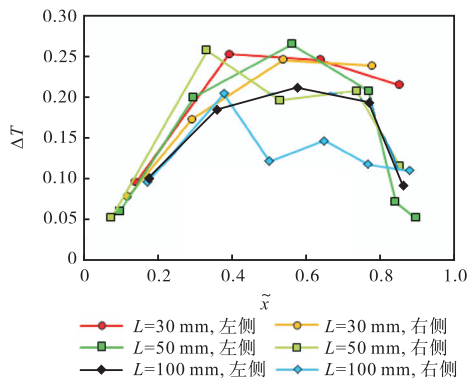
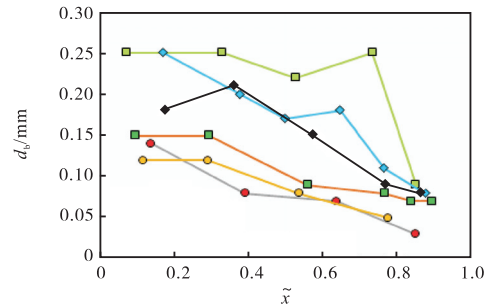


图 8 次脉同侧前间距与 $\tilde{x}$ 的关系

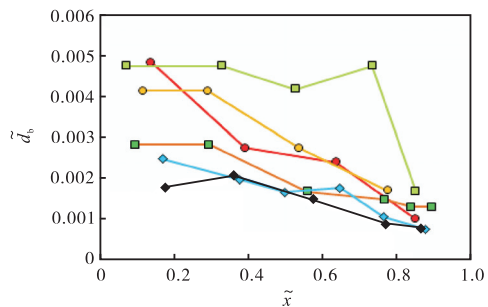
Fig.8 Relationship between the anterior spacing of the secondary vein ipsilateral side and $\tilde{x}$

据分布集中,连线变化趋势基本一致,表明海棠叶片次脉的同侧前间距与叶长大致呈正比。次脉同侧前间距与 $\tilde{x}$ 的这一关系和次脉分支角一样,当与叶片的生长过程有关。叶尖、叶基由于除了与中部一同承担居间生长活动外,还分别承担了顶端生长和较晚结束生长的额外生长活动,因而需要更密集的叶脉,以提供更多驱动生长的水和养分,导致叶片基部、中部的次脉同侧前间距较小。

次脉基部直径与 $\tilde{x}$ 的关系如图 9 所示。同一叶片内不同次脉的基部直径随 $\tilde{x}$ 的变化趋势与不同大小叶片中的基本一致,都呈线性单调递减,越接近叶尖的次脉基部直径越小。不同大小叶片上相同 $\tilde{x}$ 处的次脉的基部直径的绝对大小和相对大小之间有所不同,绝对大小关系如图 9(a) 所示, $L = 30$ mm 叶片的次脉基部直径最小, $L = 50$ mm、 100 mm 叶片的次脉基部直径明显增大,但后两者之间没有明显的差别;相对大小关系如图 9(b) 所示, $L = 30$ mm、 50 mm 叶片次脉基部直径相对大小没有明显差别,但 $L = 100$ mm 叶片次脉基部直径相对大小明显小于前两者。总而言之,大小居中的 $L = 50$ mm 叶片的次脉基部直径绝对大小、相对大小都是最大的。



(a) $\hat{d}_b - \tilde{x}$



(b) $\hat{\hat{d}}_b - \tilde{x}$

图 9 次脉基部直径与 $\tilde{x}$ 的关系

Fig.9 Relationship between the diameter of the secondary vein base and $\tilde{x}$

次脉分支前直径与 $\tilde{x}$ 的关系如图 10 所示,不同

大小叶片的数据分布高度一致且集中, $D_{\text{pre}}-\tilde{x}$ 线性拟合 $R^2 = 0.9400$, 构成显著的线性负相关关系. 考虑到次脉分支前直径的实质是中脉在不同 $\tilde{x}$ 处的直径, 次脉分支前直径与 $\tilde{x}$ 的关系实际上是中脉直径随 $\tilde{x}$ 的变化规律. 因此, 叶片中脉可以近似看作一个细长的圆锥体, 其直径随距叶基的距离增大而线性减小, 二者间函数关系

$$D = -1.15\tilde{x} + 1.17 = -1.15\frac{x}{L} + 1.17 \quad (4)$$

式中 D 为中脉直径, mm.

截距 1.17 mm 即为叶片中脉的基部直径, 该值与第 2.1.1 节所得的 1.18 mm 基本一致. 此外, 不同大小叶片的中脉在相同 $\tilde{x}$ 处的直径也没有显著差别, 这进一步验证了第 2.1.1 节中海棠叶片中脉基部直径不随叶片生长而加粗的结论.

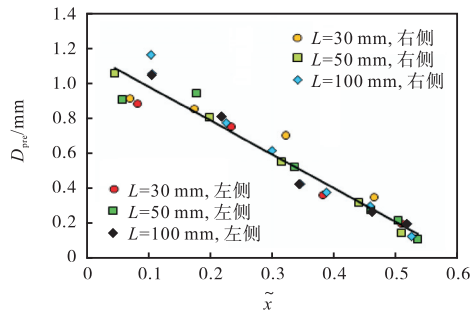
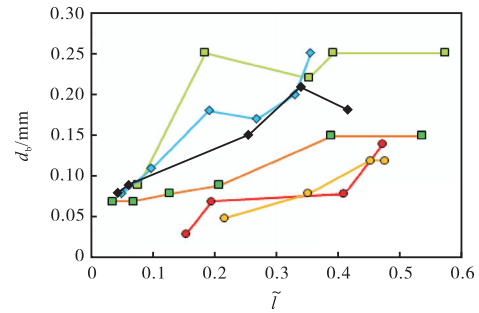


图 10 次脉分支前直径与 $\tilde{x}$ 的关系

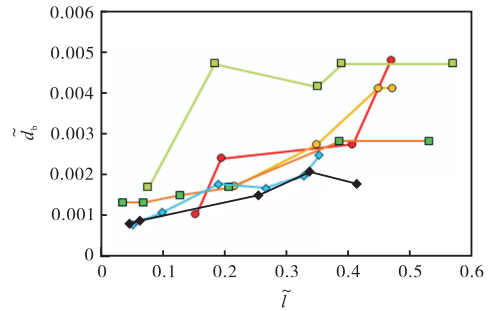
Fig.10 Relationship between the diameter before the secondary vein branch and $\tilde{x}$

2.1.3 次脉结构参数与次脉长度的关系

次脉基部直径与次脉长度的关系如图 11 所示, 为便于比较, 此处对次脉长度和基部直径统一采取叶长归一化. 同一叶片上不同次脉的基部直径与次脉长度大体呈正比关系, 表明同一叶片上不同次脉的锥度基本一致. 不同大小叶片上相同 $\tilde{x}$ 处的次脉的基部直径的大小关系在基部直径的绝对大小和相对大小之间有所不同, 说明次脉直径的生长变化在叶片生长的不同阶段有所不同. 对绝对大小而言, $L = 30$ mm 叶片的次脉基部直径较小, L 增长到 50 mm 时, 次脉基部直径明显增大, 但 $L = 100$ mm 叶片的次脉基部直径与 $L = 50$ mm 者相差不大, 这表明次脉在叶片生长期的前半段有显著的加粗, 在叶片生长的后半段则基本不再加粗. 对相对大小而言, $L = 30$ mm、50 mm 叶片的次脉相对直径基本一致, 这说明次脉在叶片生长期前半段的加粗与叶片的生长基本同步; $L = 100$ mm 叶片的次脉相对直径明显减小, 则是次脉停止加粗而叶片持续生长延长的结果.



(a) $d_b-\tilde{x}$



(b) $d_b-\tilde{x}$

图 11 次脉基部直径与 $\tilde{x}$ 的关系

Fig.11 Relationship between the diameter and length of the secondary vein base

2.2 叶脉网络水分输运特性

2.2.1 中脉及次脉中水分输运速度的时空分布

叶片中脉及所选 3 条次脉中荧光溶液流过的长度 l_g 随时间的变化情况如图 12 所示. 由图 12 可见, 荧光溶液流过中脉基部一小段后马上在次脉中流动, 其流入次脉的时间远早于流动至中脉末端的时间, 基本可以认为中脉内的荧光溶液流至次脉基部时即立刻流入该次脉并开始在次脉中流动. 荧光溶液在中脉及 3 条次脉中的扩散进程接近同步, 可以认为水分在中脉、次脉中的流动与扩散具有同步性, 即水分在到达中脉上的每个分支点时均立刻进入次脉并开始

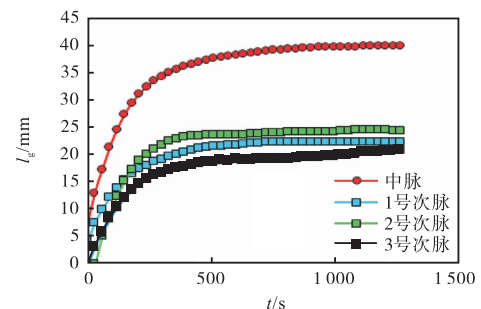


图 12 荧光溶液流过的长度 l_g 随时间的变化

Fig.12 Changes in the distance l_g covered by the fluorescent solution over time

在其中流动,中脉及各条次脉中水分在叶面上同步由叶基向叶尖推进.

叶片中脉及所选 3 条次脉中荧光溶液的流速 v 随时间的变化情况如图 13 所示. 荧光溶液的流速在中脉及 3 条次脉中随时间的变化趋势基本一致,即刚进入叶脉基部时流速最大,随后迅速降低,在几分钟内降至极小的速度,再缓慢减速至静止. 这一过程中,溶液的加速度绝对值单调递减,但始终不为 0;在速度降至 0 以前,不存在一个流速基本恒定不变、溶液匀速推进的时间区间. 此外,中脉及 3 条次脉中的溶液流速-时间曲线高度接近,同一时间各条叶脉中的溶液流速最大仅相差 0.7 倍,表明不同叶脉中的水分流速之间没有显著差别. 这一特点为中脉及次脉中水分流动的同步性奠定了动力学基础.

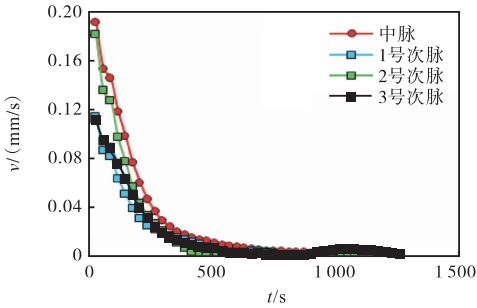


图 13 溶液流速 v 随时间的变化

Fig.13 Changes in the flow velocity v of the solution over time

中脉及所选 3 条次脉中水分流速的分布如图 14 所示. 4 条叶脉中水分流速的分布趋势基本一致,即叶脉基部流速最大,越靠近叶脉末端的位置流速越小,至叶脉末端处降至 0,这与图 13 所示的溶液流速的变化趋势一致.

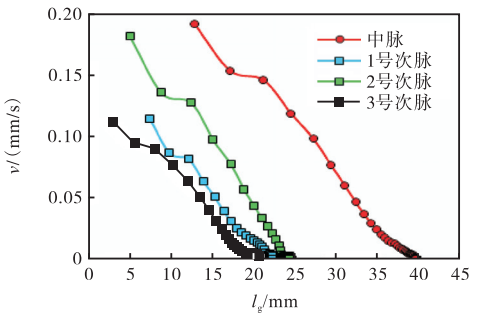


图 14 中脉、次脉中水分流速的分布

Fig.14 Distribution of water flow velocity in the midvein and secondary veins

值得注意的是,对 4 条叶脉的 v - l_g 曲线做线性拟合,结果如表 2 所示, R^2 均大于 0.950 0, 相关关系非常显著,可以认为叶片中脉及 3 条所选次脉中不同位

置的水分流速与距离叶脉基部的距离构成线性负相关关系,叶片中脉与次脉中的水分流速沿叶脉线性分布,且该线性关系的斜率在同一叶片上的不同叶脉间基本相等. 流入叶脉时速度大,远离叶脉基部时速度减小,但考虑到叶脉在远离基部时产生众多细小分支,横截面积变大,忽略水分流失,满足质量守恒定律.

表 2 4 条叶脉的 v - l_g 线性拟合结果

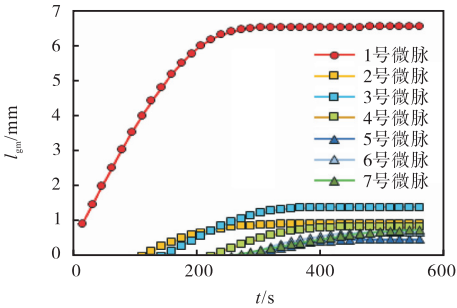
Tab.2 Results of the v - l_g linear fitting in four leaf veins

叶脉	拟合结果	R^2
中脉	$v = -0.007\ 3\ l_g + 0.285\ 8$	0.988 6
1 号次脉	$v = -0.007\ 4\ l_g + 0.163\ 4$	0.990 3
2 号次脉	$v = -0.009\ 7\ l_g + 0.234\ 8$	0.987 2
3 号次脉	$v = -0.006\ 9\ l_g + 0.137\ 4$	0.969 0

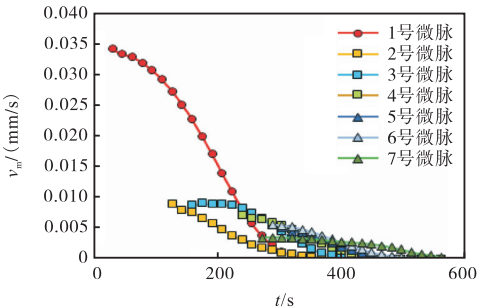
2.2.2 微脉中水分输运速度的时空分布

所选 7 条微脉中荧光溶液流过的长度 l_{gm} 及微脉中溶液的流速 v_m 随时间的变化情况如图 15 所示,为便于观察,对 2~7 号微脉单独绘图,如图 16 所示. 7 条微脉的位置如图 17 所示.

由图 15(a)、16(a)可见,荧光溶液在微脉中前进距离随时间的变化趋势基本一致,与图 12 所示的中脉、次脉中的趋势也基本一致. 值得注意的是,虽然



(a) l_{gm} 随时间的变化



(b) v_m 随时间的变化

图 15 微脉中荧光溶液流过的长度 l_{gm} 及溶液流速 v_m 随时间的变化

Fig.15 Changes in the distance l_{gm} covered by the fluorescent solution and its flow velocity v_m in the microvein over time

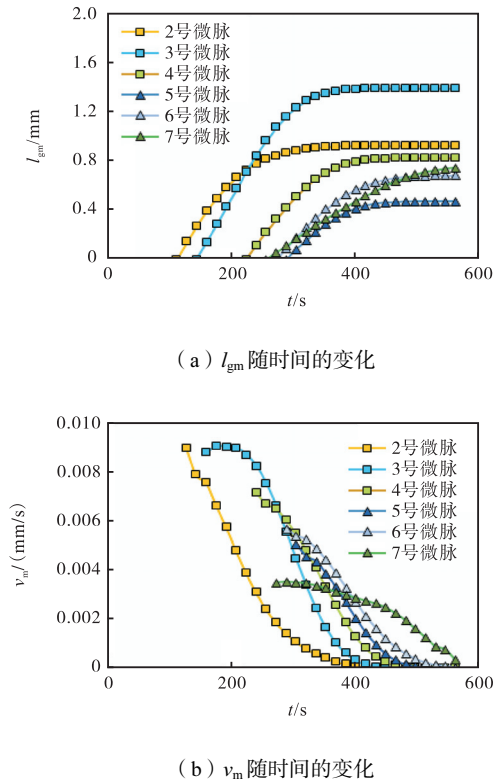


图 16 2~7号微脉中荧光溶液流过的长度 l_{gm} 及溶液流速 v_m 随时间的变化

Fig.16 Changes in the distance l_{gm} covered by the fluorescent solution in microveins 2—7 and its flow velocity v_m over time

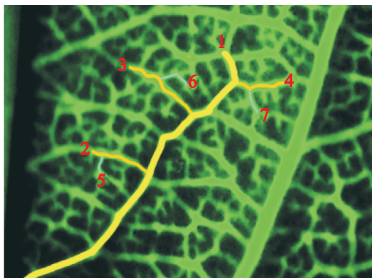


图 17 所选 7 条微脉的位置

Fig.17 Location of the seven selected microveins

5~7号这3条3级微脉与所选7条微脉组成的树状结构的基部(即1号微脉的基部)之间的距离有明显差异,但荧光溶液却是几乎同时进入这3条微脉的。此外,与中脉、次脉中荧光溶液流入次脉的时间远早于流动至中脉末端的时间不同,在微脉中,荧光溶液流入3级微脉时,2级微脉中的荧光溶液已经接近微脉末端。上述两点3级叶脉的规律在2级叶脉中同样存在,但其显著程度稍弱。综上所述,不同于中脉、次脉中的同步流动与扩散,水分在微脉中的流动与扩散具有分级性的特点,即水分大体上是先流至一条微脉的末端,将该条微脉基本充满后,才开始流入其分支的各条次级微脉;流至每条次级微脉的末端

后,才开始流入这些次级微脉分支的再次级微脉,以此类推。

由图 15(b)、16(b)可见,荧光溶液流速在微脉中随时间的变化趋势基本一致,即刚进入叶脉基部时流速最大,随后迅速降低,在几分钟内降至极小的速度,再缓慢减速至静止。但与中脉、次脉不同的是,微脉中溶液流速的加速度绝对值不是单调递减,而是先增大后减小,使 v_m-t 曲线呈 S 形。同时,3 级微脉中的溶液流速存在明显差异,1 级微脉的中流速最大,2 级微脉中的流速仅为 1 级微脉的 1/4 左右,3 级微脉中的流速则仅为 2 级微脉的 1/2。这一特点为中脉及次脉中水分流动的分级性奠定了动力学基础。

所选 7 条次脉中水分流速的分布如图 18 所示,为便于观察,对 2~7 号微脉单独绘图,如图 19 所示。7 条微脉中水分流速的分布趋势基本一致,即微脉基部流速最大,越靠近微脉末端的位置流速越小,至微脉末端处降至 0,这与图 15(b)、16(b)所示的溶液流速的变化趋势一致。但与中脉及次脉不同的是,微脉中的水分流速与距离微脉基部的距离的负相关关系不是线性的,而是呈导数绝对值不断增大的明显上凸的曲线,即越靠近微脉末端,流速随流动距离降低得越快。

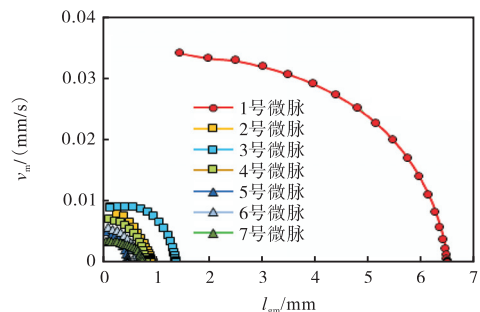


图 18 微脉中水分流速的分布

Fig.18 Distribution of water flow velocity in the microveins

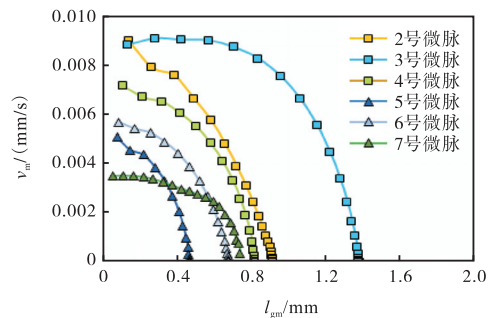


图 19 2~7号微脉中水分流速的分布

Fig.19 Distribution of water flow velocity in the microveins 2—7

3 结 论

本文以海棠为研究对象,分析了海棠叶脉结构参数的分布特征和相关关系,研究了叶脉网络的水分输运特性,为换热器、燃料电池等领域的流道仿生设计提供了新的参考。主要结论如下:

(1) 叶片的中脉可近似看作一细长圆锥体,其基部直径约为 1.18 mm,且不随叶片生长而加粗;

(2) 次脉的长度和基部直径分别与其基部距离叶基的距离呈线性负相关,基部直径仅在叶片生长的前半阶段有所加粗;次脉的分支角、同侧前间距与其基部距离叶基的距离之间也存在一定关系;

(3) 中脉及次脉中某一点处的水分流速与该点距离该条叶脉基部的距离呈线性负相关,该线性关系的斜率在同一叶片上的不同叶脉间基本相等;

(4) 中脉及次脉中的水分输运具有同步性,微脉中的水分运输则表现出不同于中脉、次脉的分级性。

本文阐明了海棠叶脉网络结构特征,包括各级叶脉的长度、直径、形状、夹角等的分布与变化特征,深入探究海棠叶片高效营养运输过程背后的生物学机制,对指导流场结构设计具有重要意义,可为散热器、均温板、燃料电池等器件的流道的仿生结构设计和参数规划提供参考与指导。

参考文献:

- [1] Tyree M T, Ewers F W. The hydraulic architecture of woody tropical plants[J]. Tropical Forest Plant Ecophysiology, 1991, 119: 345-360.
- [2] Mencuccini M. The ecological significance of long-distance water transport: Short-term regulation, long-term acclimation and the hydraulic costs of stature across plant life forms[J]. Plant Cell and Environment, 2003, 26(1): 163-182.
- [3] Roth-Nebelsick A, Uhl D, Mosbrugger V, et al. Evolution and function of leaf venation architecture: A review[J]. Annals of Botany, 2001, 87(5): 553-566.
- [4] Murray C D. The physiological principle of minimum work: I. The vascular system and the cost of blood volume[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1926, 12: 207-214.
- [5] Murray C D. The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries[J]. Journal of General Physiology, 1926, 9(6): 835-841.
- [6] Murray C D. A relationship between circumference and weight in trees and its bearing on branching angles[J]. Journal of General Physiology, 1927, 10(5): 725-729.
- [7] Rosa D M I, Santulli C, Sarasini F. Mechanical and thermal characterization of epoxy composites reinforced with random and quasi-unidirectional untreated Phormium tenax leaf fibers[J]. Materials & Design, 2010, 31(5): 2397-2397.
- [8] 房 栋. 基于圆形盾状叶片的仿生微流道散热器结构设计及改进[D]. 西安: 西安电子科技大学机电工程学院, 2022.
Fang Dong. Structural Design and Improvement of Bionic Micro-Channel Radiator Based on Circular Shield Blades[D]. Xi'an: School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, 2022 (in Chinese).
- [9] 张 员, 高怀斌, 侯兴旺, 等. 基于仿生叶脉液冷通道的锂电池散热特性研究[J]. 低温与超导, 2024, 52(3): 102-110.
Zhang Yuan, Gao Huaibin, Hou Xingwang, et al. Study on heat dissipation characteristics of lithium-ion battery of liquid cooling channel based on bionic vein[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2024, 52(3): 102-110 (in Chinese).
- [10] 汪维伟, 黄昕之, 赵福云, 等. 基于叶脉仿生的散热均热板性能研究[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(2): 138-147.
Wang Weiwei, Huang Xinzhi, Zhao Fuyun, et al. The performance of vapor chamber based on leaf-vein-like structure for heat dissipation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(2): 138-147 (in Chinese).
- [11] 李志强, 孙广强, 巴义春, 等. 锂离子电池仿生叶脉流道冷板散热研究[J]. 低温与超导, 2023, 51(8): 69-75.
Li Zhiqiang, Sun Guangqiang, Ba Yichun, et al. Research on heat dissipation of lithium-ion battery pack based on bionic leaf vein channel cold plate[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2023, 51(8): 69-75 (in Chinese).
- [12] 缪沁玥, 王 林, 郭旭晨, 等. 石楠叶片面积和叶脉性状之间的关系[J]. 西部林业科学, 2023, 52(1): 86-91, 105.
Miao Qinyue, Wang Lin, Guo Xuchen, et al. Relationships between the leaf lamina area and leaf vein traits of photinia serratifolia[J]. Journal of West China Forestry Science, 2023, 52(1): 86-91, 105 (in Chinese).
- [13] 刘梦葭. 九种木兰科植物叶面积、叶形和叶脉性状的

- 关系[D]. 南京: 南京林业大学生态与环境学院, 2021.
- Liu Mengdi. Relationships between Leaf Area, Leaf Shape and Leaf Vein Traits of Nine Magnoliaceae Species[D]. Nanjing: College of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, 2021 (in Chinese).
- [14] 吴一苓, 李芳兰, 胡 慧. 叶脉结构与功能及其对叶片经济谱的影响[J]. 植物学报, 2022, 57(3): 388-398.
- Wu Yiling, Li Fanglan, Hu Hui. The structure and function of leaf veins and their influence on leaf economic spectrum[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(3): 388-398 (in Chinese).
- [15] Fang J. A review on eco-hydrological effects of condensation water[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(3): 275-281.
- [16] 余绍文, 张 溪, 段丽军, 等. 氢氧稳定同位素在植物水分来源研究中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5): 1-6.
- Yu Shaowen, Zhang Xi, Duan Lijun, et al. Application of stable hydrogen and oxygen isotope to the study of plant water use sources[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(5): 1-6 (in Chinese).
- [17] 杜雪莲, 王世杰. 稳定性氢氧同位素在植物用水策略中的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(22): 5-10.
- Du Xuelian, Wang Shijie. Recent advances of stable hydrogen and oxygen isotopic techniques in plant water use strategy[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(22): 5-10 (in Chinese).
- [18] Salleo S, Raimondo F, Trifilò P, et al. Axial-to-radial water permeability of leaf major veins: A possible determinant of the impact of vein embolism on leaf hydraulics[J]. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(10): 1749-1758.
- [19] Liu W, Luo Y, Wang L, et al. Water transport in leaf vein systems and the flow velocity measurement with a new method[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 204: 74-84.

(责任编辑: 王晓燕)