

引用格式: 王瑞庆, 周晋浩, 程远东, 等. 温度对巨峰葡萄节间和带节茎段导水特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(6): 0863-0869. [WANG R Q, ZHOU J H, CHENG Y D, et al. Effect of temperature on water conductance of internode and single-node stem segment of *Vitis vinifera* L. $\times$ *V. labrusca* L. [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(6): 0863-0869.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230740

温度对巨峰葡萄节间和带节茎段 导水特性的影响

王瑞庆, 周晋浩, 程远东, 刘文玲, 张 莉*

(上饶师范学院 生命科学院, 江西上饶 334001)

摘要 【目的】研究旨在明确巨峰葡萄枝条木质部导水能力与温度的量化关系, 探索节对水分运输效率与安全性的影响。【方法】以巨峰葡萄 1 年生枝条为材料, 在 0.5~40 °C 温度范围, 利用低压液流计法测试节间和带节茎段的导水率、比导率及导水率损失(PLC)随温度的变化, 分析节与节间茎段导水特性的差异。【结果】巨峰葡萄茎段导水率和比导率均与温度呈极显著的线性关系。当温度从 0.5 °C 升高至 40 °C, 节间茎段的初始导水率、最大导水率、初始比导率、最大比导率分别升高 154%、198%、157% 和 200%。节间茎段的导水率和比导率显著大于带节茎段, 且差异随着温度升高呈增大趋势。节间茎段的 PLC 显著大于带节茎段, 而带节茎段的导水率和比导率受温度的影响小于节间茎段。利用线性回归方程可对不同温度下的导水率和比导率进行预测。导水率和比导率与各温度下水的粘滞系数进行权衡后, 各温度下的权衡导水率和权衡比导率没有明显差异。【结论】葡萄茎段导水率和比导率随着温度升高而增大, 节对水分运输的效率和安全性有权衡作用。

关键词 巨峰葡萄; 温度; 导水率; 比导率; 节; 木质部

中图分类号 Q945.79; S663.1 **文献标志码** A

Effect of temperature on water conductance of internode and single-node stem segment of *Vitis vinifera* L. $\times$ *V. labrusca* L.

WANG Ruiqing, ZHOU Jinhao, CHENG Yuandong, LIU Wenling, ZHANG Li*

(College of Life Sciences, Shangrao Normal University, Shangrao, Jiangxi 334001, China)

Abstract [Objective] The purpose of present study is to clarify the quantitative relationship between the hydraulic conductance of vine stem segments and temperature, and to explore the influence of nodes on water transport efficiency and safety. [Methods] The water conductivity (K), sapwood specific conductivity (K_s) and percent loss of conductivity (PLC) of internode and single-node stem segments of *Vitis vinifera* L. $\times$ *V. labrusca* L. were measured by low pressure flow meter method with the temperature range of 0.5–40 °C, and the difference of water conductivity between the two segments were analyzed. [Results] The K and K_s of *V. vinifera* L. $\times$ *V. labrusca* L. stem segment had significant linear relationship with temperature. As temperature raised from 0.5 °C to 40 °C, the initial conductivity, maximum conductivity, initial K_s and maximum K_s of internode stem increased 154%, 198%, 157% and 200%, respectively. The

收稿日期: 2023-11-18; 修改稿收到日期: 2024-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860200, 31701521); 江西省自然科学基金项目(20171BAB204008)

作者简介: 王瑞庆(1978—), 男, 副教授, 主要从事植物木质部水力学结构和功能研究。E-mail: w_ruiqing@163.com

* 通信作者: 张 莉, 教授, 主要从事葡萄生理研究。E-mail: 306249327@qq.com

K and K_s values in internode stem segment were higher than those in single-node stem segment, and the difference increased with the increase of temperature. The PLC of internode stem segment was significantly greater than that of single-node stem segment, while the water conductivity and specific conductivity of single-node stem segment were less affected by temperature than that of internode stem segment. The linear regression equation could be used to predict the K and K_s values at different temperatures. As the K and K_s being tradeoff against the viscosity coefficient of the water at each temperature, it showed no significant difference among the tradeoff water conductivity (K') and sapwood specific conductivity (K'_s) at different temperatures. **[Conclusion]** The K and K_s of *V. vinifera* L. $\times$ *V. labrusca* L. stem increased with the rise of temperature, and the node could tradeoff the efficiency and safety of the stem water transport. **Key words** *Vitis vinifera* L. $\times$ *V. labrusca* L.; temperature; hydraulic conductivity; sapwood specific conductivity; node; xylem

植物木质部水分运输是联系许多生理活动的枢纽和主干^[1],其运输效率 and 安全性对蒸腾、气孔开闭、光合碳同化等生理活动有重要的调控和协调作用^[2-4],二者主要通过植物木质部的导水特性相关参数如导水力(hydraulic conductance, K_h)、导水率(conductivity, K)、木比导率(sapwood specific conductivity, K_s)及其变化来衡量,是研究水分沿树体上升(植物水力学)的主要技术方法^[5-6]。其中,导水率和木比导率权衡了植物材料的长度或直径对输导能力的影响,更能反映植物材料自身与水分运输相关的结构特性,成为水力学研究的常规指标^[7-8]。

水分(树液)在木质部导管的运输符合 Hagen-Poiseuille 定律^[9-10],其效率除了与水势梯度和自身情况(横截面积和长度等)有关外还与液体的粘滞系数有关,因而受环境温度的影响^[11]。目前关于温度对植物导水能力的影响研究主要集中在环境温度,尤其是土壤温度的影响方面。土壤温度影响了根系的生理活动,直接影响了根毛的主动运输,因而对于多数植物而言,10~30℃属适宜的温度范围,过高或过低环境温度都会对植物水分输导产生不利影响^[12-14]。Yamamoto^[15]利用生长5d的秋葵幼苗上胚轴进行测试,通过不同温度环境上胚轴在高渗透溶液中的失水(收缩)速率判断温度对导水率的影响,测试结果显示,茎段的水分流动速度与温度正相关,该研究利用间接方法测试了水分在活组织内的短距离运输速率与温度的量化关系,而关于水分在木质部(死细胞)内运输效率与温度的关系研究相对较少。Co-chard^[13]曾用高压液流计法测试了温度对栎树茎段和根的水力导度的影响,在温度从20℃下降至2℃的过程,导水力下降了50%,但由于测试数据较少(3个茎段),因而该研究尚未建立二者的关系模型,温度与木质部导水特性的量化关系仍待明确。

植物木质部导水特性的测定可分为直接法和间

接法,包括压力室法、压力探针法、蒸发流通量法、高压液流计法、低压液流计法等^[12,16]。其中,Sperry等^[17]建立的低压液流计法(low pressure flow meter, LPFM)更接近于树液在植物内的运输状况,并可削弱高压液流计法由于高压使液体填充胞间空间的问题^[18],因此测量误差相对较小,是其中最直接、可靠和普遍采用的方法之一^[8,19]。本研究以巨峰葡萄(*Vitis vinifera* L. $\times$ *V. labrusca* L.)1年生枝条为材料,利用低压液流计法测试温度对植物茎段木质部导水特性的直接影响,量化自然导水率和最大导水率随温度的变化关系;分析了节间与带节茎段对温度变化的响应差异,揭示了节在植物水分运输效率与安全性中的潜在作用;探讨了茎段导水特性在不同温度间进行预测的可能性;提出了权衡导水率和权衡比导率的概念,分析权衡后不同温度下测试结果之间进行比较的可能性。该研究有助于科学认识和正确评估不同温度环境下植物材料的水分运输能力。

1 材料和方法

1.1 材料

巨峰葡萄枝条于2022年10月采自江西省上饶市好兆头葡萄园,试验地位于东经118°0'59",北纬28°23'47",属亚热带湿润型气候。葡萄树龄8年,南北行向,株行距为1.5 m $\times$ 2.5 m,Y式整形,采用塑料膜(0.05 mm PVC透明薄膜)拱棚简易避雨栽培。选择田间管理、长势相对一致,树体健康的相邻6棵植株,在植株外围选取长度0.8 m以上,直径约6 mm,生长良好、没有机械损伤、枝条和导管已成熟、状态相对一致的1年生枝条,向叶片洒水后用黑色塑料膜包裹平衡20 min,切离树体后30 min内运回实验室置于水槽内备用。每株采2~3枝,共16个枝条。

1.2 测定方法

导水率测定装置为低压液流计,方法详见 Sper-

ry^[17]的介绍,通过公式(1)和公式(2)分别计算导水率 $[K, (\text{kg} \cdot \text{m})/(\text{s} \cdot \text{MPa})]$ 和比导率 $[K_s, (\text{kg} \cdot \text{m})/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MPa}) \text{ 或 } \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{MPa})]$ 。

$$K=QL/\Delta P$$

(1)

$$K_s=QL/(\Delta PA)$$

(2)

式中: Q 为流速; L 为测试茎段的长度; A 为横截面积; ΔP 为茎段两端的压力差。

装置与计算机连接,操作软件由 Melvin T. Tyree 教授编写,通过输入材料信息(长度、直径等)及对液面差(压力差)的监测,进行导水率等的动态监测与测定。测试系统溶液参考 Van Ieperen^[20]的研究,使用 0.04 mol/L 的 KCl 溶液,用超纯水配制,抽真空后备用。将枝条浸于水中,每个枝条选取位于中部位置的茎段,剪切长度约 3 cm、直径约 6 mm 的相邻茎段共 2 段,其中 1 段带 1 个节,1 段为节间,装入低压液流计(LPFM)系统,与硅胶管连接并检查气密性完好。将 LPFM 测试系统的管路部分和茎段整体浸入水浴中,以更好地维持系统温度稳定,通过水浴、热水和制冷机制作的冰沙协同调节温度,用温度计和温度探针监控温度变化,各测试温度下均保温约 20 min,待茎段内部与周围水温一致时进行测定。处理温度选取 0.5℃、5℃、10℃、20℃、30℃、40℃,即葡萄生长季节主要的环境温度范围。先测试各温度下的初始比导率和初始导水率,后测试最大比导率和最大导水率,测试温度由低到高进行。共选取 16 个枝条上的带节和节间茎段各 16 个进行测定($N=16$),以节间为对照,分析各温度下节对导水特性的影响。

上述测定结果为葡萄茎段的初始导水率 K_i (自然导水率)与初始比导率 K_{si} (自然比导率)。最大导水率(K_{max})测定是在测定各个温度下的初始导水率后,将茎段在 120 kPa 压强下,用 0.04 mol/L 的 KCl 溶液冲洗 1 min 后再测定导水率值(K_f),重复上述冲洗和测定过程,直至冲洗后导水率值没有明显增加,记录最大值为该茎段的最大导水率 K_{max} 。 K_{max}/A 即为相应的最大比导率值。并据此计算导水率损失(percent loss of conductivity, PLC): $R_{PLC}=(K_{max}-K_i)/K_{max} \times 100^{[21]}$ 。

将各茎段(节间)在不同温度下测定的比导率值进行线性回归拟合,利用线性拟合曲线计算各茎段在各测试温度的比导率值作为预测值,分析测定值与预测值的关系及预测的可能性。

本研究中,温度系数定义为温度每变化 10℃,导水率相关参数相应变化的倍数,用 Q_{10} 表示。将各温度下测定的导水率与比导率值乘以各温度下水的

粘滞系数,该数值作为权衡导水率(K')或权衡比导率(K'_s),用权衡导水率与权衡比导率与温度作图,分析权衡后各温度下数值的差异性。

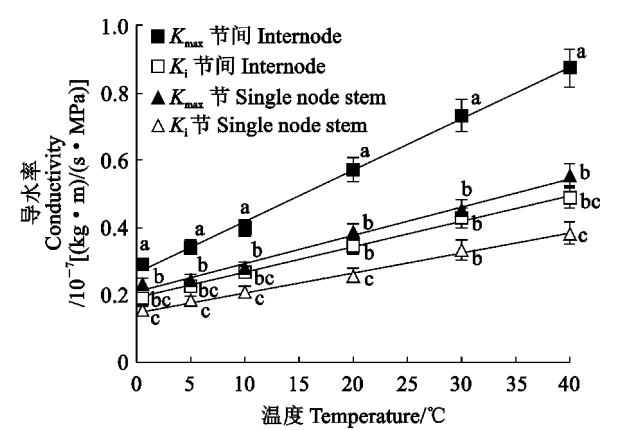
1.3 数据分析

用 PASW Statistics 18.0 软件进行线性回归和差异显著性分析,图中误差线代表标准误(SE)值。

2 结果与分析

2.1 节间和带节茎段导水率与温度的关系

如图 1 和表 1 所示,随着温度升高,巨峰葡萄节间与带节茎段的初始导水率和最大导水率均呈直线关系显著升高($P<0.001$)。当温度从 0.5℃ 升高到 40℃,节间茎段的自然导水率和最大导水率分别升高了 1.54 倍和 1.98 倍,即温度系数(Q_{10})分别为 39.10% 和 50.08%;带节茎段的自然导水率与最大导水率分别升高了 1.44 倍和 1.36 倍, Q_{10} 分别为 36.54% 和 34.50%。



各温度下不同小写字母表示对应的导水率之间在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 初始导水率和最大导水率随温度的变化
The different lower letters at each temperature indicate significant difference among corresponding water conductivity at 0.05 level ($P<0.05$). The same as below.

Fig. 1 Variation of initial and maximum conductivity with temperature

各温度条件下,枝条节间茎段的 K_i 和 K_{max} 整体均明显大于相应的带节的茎段($P<0.05$),且随着温度升高,差异呈增大趋势。例如,在 0℃ 时,节间茎段的自然导水率与最大导水率分别高于带节茎段 22.7% 和 28.2%;而在 40℃ 时,则分别比带节茎段高 27.7% 和 57.4%。此外,各温度条件下,带节茎段和节间茎段的最大导水率均显著高于各自的自然导水率($P<0.05$)。

导水率与温度的线性拟合方程的斜率,可体现

各参数受温度变化影响的程度。斜率越大,导水率受温度影响的程度越大, Q_{10} 值也越大。表 1 表明:各拟合方程的斜率由大到小分别为 $K_{\max \text{节间}} > K_{\max \text{节}}$

$> K_{\text{节间}} > K_{\text{节}}$,即其他条件一致的情况下,最大导水率受温度的影响大于初始导水率,节间茎段导水率受温度的影响大于带节茎段。

表 1 导水率(y)与温度(x)的关系
Table 1 Correlation between conductivity (y) and temperature (x)

材料 Material	导水率 Conductivity	回归方程 Regression equation	斜率 Slope	温度系数 $Q_{10}/\%$	R^2	P	Sig.
节间茎段 Internode stem	K_i	$y=7.65 \times 10^{-10} x+1.92 \times 10^{-8}$	0.77×10^9	39.10	0.998 3	1.14×10^{-6}	***
	$K_{\max}$	$y=1.51 \times 10^{-9} x+2.69 \times 10^{-8}$	1.51×10^9	50.08	0.997 0	3.30×10^{-6}	***
带节茎段 Single node stem	K_i	$y=5.84 \times 10^{-10} x+1.52 \times 10^{-8}$	0.58×10^9	36.54	0.995 9	6.46×10^{-6}	***
	$K_{\max}$	$y=8.34 \times 10^{-10} x+2.13 \times 10^{-8}$	0.83×10^9	34.50	0.989 2	4.35×10^{-5}	***

注:*** 表示线性关系在 0.001 水平显著($P<0.001$)。下同。
Note: *** indicate a significant linear relationship at 0.001 level ($P<0.001$). The same as below.

2.2 节间和带节茎段比导率与温度的关系

由图 2 和表 2 可知,随着温度升高,巨峰葡萄枝条节间茎段和带节茎段初始比导率 K_{si} 和最大比导率 $K_{s,max}$ 均呈线性极显著升高($P<0.001$)。当温度从 0.5℃ 升高至 40℃,节间茎段的 K_{si} 和 $K_{s,max}$ 分别从 2.18×10^{-4} , 3.32×10^{-4} kg/(m·s·MPa) 升高至 5.59×10^{-4} , 9.93×10^{-4} kg/(m·s·MPa), 分别升高了 157% 和 200%,即节间茎段 K_{si} 与 $K_{s,max}$ 的温度系数 Q_{10} 分别为 39.61% 和 50.55%;带节茎段 K_{si} 和 $K_{s,max}$ 分别从 1.65×10^{-4} , 2.49×10^{-4} kg/(m·s·MPa) 升高至 4.09×10^{-4} , 5.95×10^{-4} kg/(m·s·MPa), 分别上升了 147.5% 和 138.6%,即带节茎段 K_{si} 与 $K_{s,max}$ 的温度系数 Q_{10} 分别为 37.34% 和 35.09%。

各温度下,枝条节间茎段的 K_{si} 和 $K_{s,max}$ 整体均明显大于带节的茎段($P<0.05$),且随着温度升高,差异呈增大趋势。其中,节间茎段的自然比导率与最大比导率在 0℃ 时分别高于带节茎段 31.8% 和 33.0%,而在 40℃ 时则分别高于带节茎段 36.7% 和 67.0%。各温度下,节间茎段和带节茎段的 $K_{s,max}$

值均显著高于 K_{si} 值($P<0.05$)。同时,在表 2 中,线性拟合方程的斜率越大,比导率受温度影响的程度越大, Q_{10} 值也越大。由表 2 可知,斜率由大到小分别为 $K_{s,max \text{节间}} > K_{s,max \text{节}} > K_{si \text{节间}} > K_{si \text{节}}$ 。即其他条件一致的情况下,最大比导率受温度的影响大于初始比导率,节间茎段比导率受温度的影响大于带节茎段。

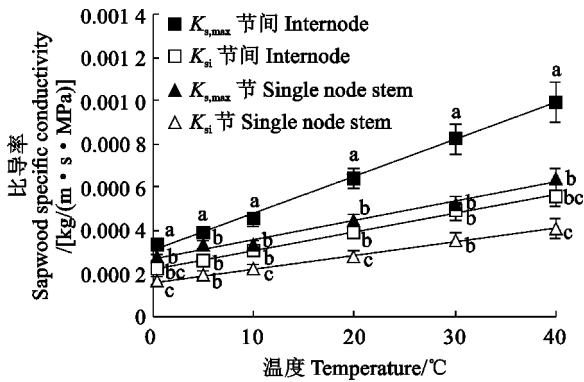


图 2 初始比导率和最大比导随温度的变化
Fig.2 Variation of initial and maximum K_s with temperature

表 2 比导率(y)与温度(x)的关系
Table 2 Correlation between sapwood specific conductivity (y) and temperature (x)

材料 Material	比导率 Sapwood specific conductivity	回归方程 Regression equation	斜率 Slope	温度系数 $Q_{10}/\%$	R^2	P	Sig.
节间茎段 Internode stem	K_{si}	$y=8.77 \times 10^{-6} x+2.15 \times 10^{-4}$	0.877×10^5	39.61	0.998 4	9.09×10^{-7}	***
	$K_{s,max}$	$y=1.72 \times 10^{-5} x+3.01 \times 10^{-4}$	1.720×10^5	50.55	0.996 8	3.88×10^{-6}	***
带节茎段 Single node stem	K_{si}	$y=6.28 \times 10^{-6} x+1.59 \times 10^{-4}$	0.628×10^5	37.34	0.995 7	6.78×10^{-6}	***
	$K_{s,max}$	$y=8.92 \times 10^{-6} x+2.65 \times 10^{-4}$	0.892×10^5	35.09	0.981 5	4.00×10^{-5}	***

2.3 不同温度下节间和带节茎段的导水率损失

由图 3 可见,在 0.5~40 ℃ 范围,巨峰葡萄茎段导水率损失(PLC)随着温度升高没有明显的变化规律。不同温度下,带节茎段和节间茎段 PLC 分别在 25.4%(5 ℃ 时)~34.8%(0 ℃ 时)和 31.3%(5 ℃ 时)~41.7%(40 ℃ 时)之间。节间茎段 PLC 比带节茎段大 0.1%(0 ℃ 时)~12.4%(30 ℃ 时),但差异未达到显著水平($P>0.05$)。同时,将所有温度下 PLC 进行比较时,节间茎段 PLC 总体明显高于带节茎段的 PLC($P<0.05$)。节间茎段与带节茎段的 PLC 差异($\Delta\text{PLC}=\text{PLC}_{\text{节间}}-\text{PLC}_{\text{节}}$)与温度呈明显的线性关系($R=0.845, P=0.034<0.05$),即随着温度升高,二者差异呈显著增大趋势($P<0.05$,图 4)。

2.4 茎段导水率和比导率的预测

将各茎段在不同温度下的导水率和比导率值进行线性回归拟合,利用线性曲线计算各茎段在各测试温度的导水率和比导率值作为预测值,将所有测试茎段(包括节间和带节茎段)的预测值与实际测定值进行拟合。结果(图 5)显示,导水率($R=0.993\ 3, P=7.73\times10^{-169}$)和比导率($R=0.994\ 8, P=1.37\times10^{-178}$)的预测值与实际测定值之间均存在极显著的线性关系。在 0.5~40 ℃ 范围,通过测定茎段在已知温度下的比导率值可以较好地对其他温度下的比导率值进行预测。

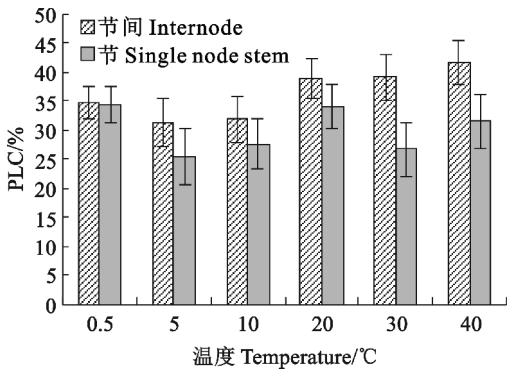


图 3 不同温度下节间和带节茎段导水率损失(PLC)

Fig. 3 Loss of water conductivity of internode and single node stem at different temperature

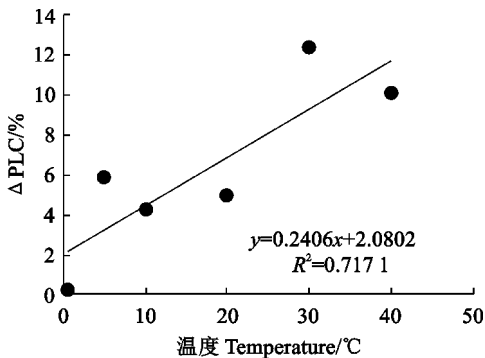


图 4 节间与带节茎段 PLC 差异随温度的变化

Fig. 4 Variation of PLC difference between internode and single node stem segment with temperature

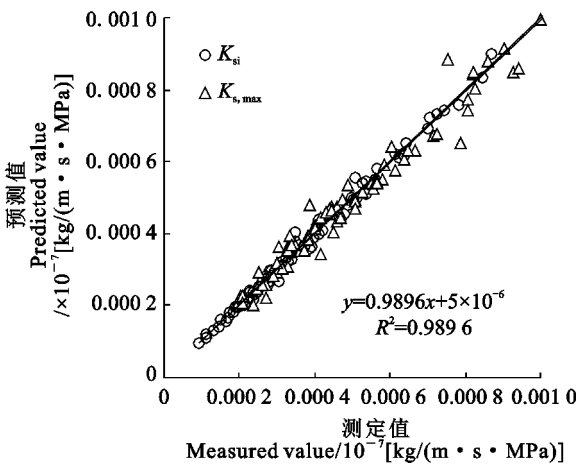
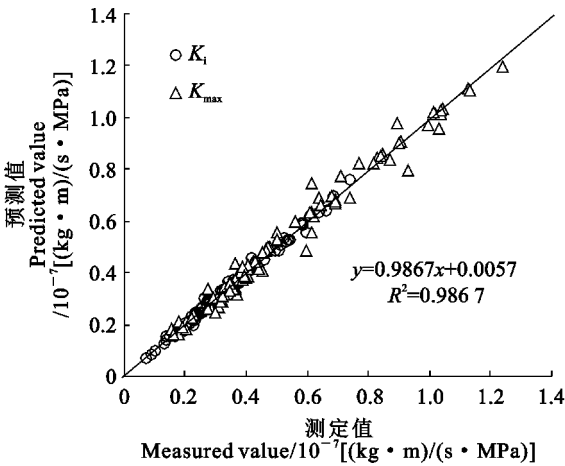


图 5 导水率(K)和比导率(K_s)测定值与预测值的关系

Fig. 5 Measured and predicted values of water conductivity (K) and water sapwood specific conductivity (K_s)

2.5 茎段权衡导水率与权衡比导率

为说明导水率(比导率)、温度、粘滞系数之间的关系,将导水率和比导率分别乘以各温度下水的粘滞系数作为权衡导水率(K')和权衡比导率(K'_s),将 K' 和 K'_s 分别与温度作散点图。结果(图 6)显示,初始导水

率(K_i)和初始比导率(K_{si})的权衡值随着温度变化无明显的变化规律,各温度下数值也无明显差异($P>0.05$);而最大导水率(K_{max})和最大比导率($K_{s,max}$)进行权衡后,随着温度升高,二者有缓慢升高的趋势,但各温度下的权衡值之间也没有明显差异($P>0.05$)。

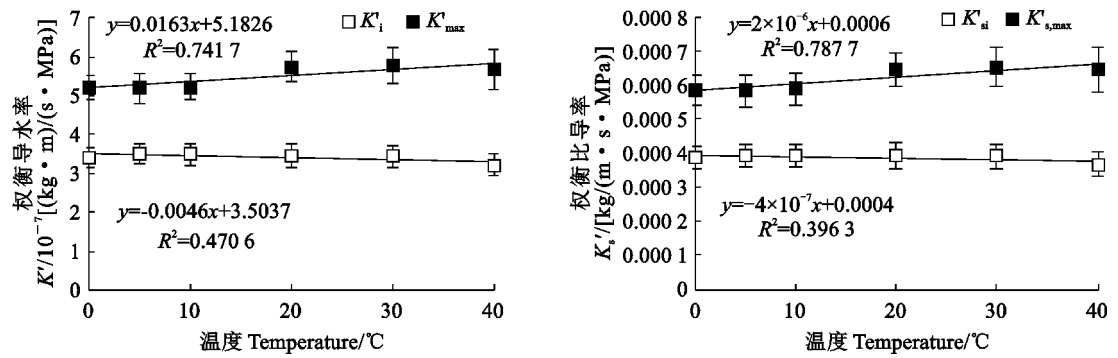


图 6 茎段权衡导水率和权衡比导率随温度的变化

Fig. 6 Variation of tradeoff conductivity and tradeoff sapwood specific conductivity of stem with temperature

3 讨 论

3.1 巨峰葡萄茎段导水效率随温度的变化

Dimond^[9]最早提出水分在植株体内的运输符合 Hagen-Poiseuille 方程,该方程描述了液体通过毛细管进行平流运动时各因素对流速的影响。根据方程,植物木质部运输水分的速率,除了与水势梯度和自身情况(半径和长度等)有关外,还与树液的黏度(η)成反比,而后者在植物体内受到温度和溶液离子种类和浓度的影响。植物木质部中的树液浓度相对较低,对流速影响相对较小^[22-23],而植物生长的环境温度通常周年变化明显,是影响树液粘滞系数的主要因素,进而影响水分的运输速率^[11]。本研究提出了权衡比导率和权衡导水率概念,当导水率和比导率乘以各温度下水的粘滞系数进行权衡后,权衡比导率和权衡导水率随着温度变化不发生明显变化(图 6),本研究结果说明:温度引起的巨峰葡萄茎段导水率和比导率变化,主要是由于不同温度下水的粘滞系数变化所致,这与上述前人观点^[11,22]一致,且与 Hagen-Poiseuille 方程吻合。在生产和科研中,可通过使用权衡导水率(权衡比导率)参数来避免因忽视温度差异形成的导水参数的不确定性,使不同研究中导水特性的相关测定具有可比性。

本研究量化了导水率和比导率与温度的关系,二者均与温度呈极显著的线性正相关。初始导水率随温度变化的斜率小于最大导水率,体现了初始导水率受温度的影响更小,说明植物茎段栓塞后,水分运输效率受温度变化的影响程度降低。此外,植物的水分运输能力存在季节性差异,除因环境对植物生理活动的影响外,根据本研究结果,温度变化对运输体系的物理影响,也是形成这种差异的主要原因之一。

3.2 巨峰葡萄节与节间茎段导水率差异

巨峰葡萄带节茎段的导水率和比导率均明显低

于节间茎段(图 1、图 2),因而,节为限制枝条(茎)导水效率的重要因素。节降低水分的运输效率,可能是植物自身适应和抵御干旱环境,限制水分消耗的一种机制。而带节茎段的导水率损失小于节间茎段(图 3、图 4),说明节在限制导水效率的同时,相对于节间来说一定程度上可以缓解栓塞。本研究从节的角度,证明了植物木质部在水分运输效率和运输安全性之间存在着权衡关系^[24-25]。与节间茎段相比,带节茎段导水率损失受温度变化的影响相对较小,因而在温度的昼夜和季节性变化中,节对于维持水分运输的稳定与安全发挥着潜在的作用,其结构与功能特性值得进一步探讨。在植物木质部水力学结构和功能的研究中,应重视节的影响。木质部是植物运输水分和营养物质的重要组织,结合温度对其导水能力的影响,进一步研究葡萄的水分需求与木质部水分运输规律,可为不同生长时期的葡萄制定合理的水肥管理与树体管理措施提供借鉴。

4 结 论

目前植物木质部水力学功能与结构间的关系尚不清晰,远远无法通过水力学结构预测其功能。温度的影响导致不同测试间的可比性更加复杂。温度差异可能会掩盖、削弱或夸大测试材料本身的差异。然而,本研究结果表明,温度对木质部导水性能的影响是有规律,且可以量化的。

(1)巨峰葡萄茎段的导水率和比导率随温度变化均呈极显著线性关系变化($P \leq 4.35 \times 10^{-5}$),利用线性回归方程可对不同温度下的导水率和比导率进行预测。

(2)最大导水率和最大比导率受温度影响大于初始导水率和初始比导率;节间茎段导水率和比导率受温度的影响大于带节茎段。

(3)权衡比导率和权衡导水率随温度变化不发

生明显改变,利用这 2 个参数可避免因忽视温度差异导致的不同研究中导水特性的不确定性。

(4)带节茎段的导水率和比导率显著低于节间茎段,节是限制枝条导水效率的重要因素,而带节茎

段的抗栓塞能力高于节间茎段。从节的角度看,木质部在水分运输效率和运输安全性之间存在着权衡。节的结构及水力学功能值得进一步探索。

参考文献:

[1] 王瑞庆,张莉,郭连金,等. 植物木质部水力学研究进展[J]. 西北植物学报, 2020, 40(12): 2157-2168.
WANG R Q, ZHANG L, GUO L J, *et al.* Advance in plant xylem hydraulics [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(12): 2157-2168.

[2] ZHU L W, ZHAO P. Climate-driven sapwood-specific hydraulic conductivity and the Huber value but not leaf-specific hydraulic conductivity on a global scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159334.

[3] BRODERSEN C R, RODDY A B, WASON J W, *et al.* Functional status of xylem through time[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2019, 70: 407-433.

[4] 夏英,李婕婷,唐婧,等. 山茶和西洋杜鹃花瓣及叶片的栓塞脆弱性比较[J]. 西北植物学报, 2023, 43(1): 79-87.
XIA Y, LI J T, TANG J, *et al.* Comparative study on embolism vulnerability in petals and leaves of *Camellia japonica* and *Rhododendron hybridum*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(1): 79-87.

[5] MCDOWELL N G, BRODRIBB T J, NARDINI A. Hydraulics in the 21st century[J]. *The New Phytologist*, 2019, 224(2): 537-542.

[6] DE MORAES D H M, MESQUITA M, GRACIANO-RIBEIRO D, *et al.* The effect of xylem vessel diameter on potential hydraulic conductivity in different rice stem longitudinal positions[J]. *Flora*, 2022, 295: 152147.

[7] ROWLAND L, DA COSTA A C L, GALBRAITH D R, *et al.* Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 119-122.

[8] 陈志成,姜丽娜,冯锦霞,等. 木本植物木质部栓塞测定技术的争议与进展[J]. 林业科学, 2018, 54(5): 143-151.
CHEN Z C, JIANG L N, FENG J X, *et al.* Progress and controversy of xylem embolism determination techniques in woody plants[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(5): 143-151.

[9] DIMOND A E. Pressure and flow relations in vascular bundles of the tomato plant[J]. *Plant Physiology*, 1966, 41(1): 119-131.

[10] BOURSIAIC Y, PRADAL C, BAUGET F, *et al.* Phenotyping and modeling of root hydraulic architecture reveal critical determinants of axial water transport[J]. *Plant Physiology*, 2022, 190(2): 1289-1306.

[11] NOBEL P S. Biophysical plant physiology and ecology[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1983.

[12] 杨启良,张富仓,刘小刚,等. 环境因素对植物导水率影响的研究综述[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 456-461.
YANG Q L, ZHANG F C, LIU X G, *et al.* Research progress in plant hydraulic conductance under different environmental factors [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 456-461.

[13] COCHARD H, MARTIN R, GROSS P, *et al.* Temperature effects on hydraulic conductance and water relations of *Quercus robur* L. [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(348): 1255-1259.

[14] 张娟,张坤,王玉安. 红地球葡萄延后栽培成熟期水分运输研究[J]. 西北植物学报, 2019, 39(10): 1776-1784.
ZHANG J, ZHANG K, WANG Y A. Study on water transport of red globe grape during delayed cultivation maturity [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(10): 1776-1784.

[15] YAMAMOTO R. Dependence of water conductivity on pressure and temperature in plant stems[J]. *Biorheology*, 1995, 32(4): 421-430.

[16] KRIEGER L, SCHYMANSKI S J. A new experimental set-up to measure hydraulic conductivity of plant segments[J]. *AoB Plants*, 2023, 15(4): plad024.

[17] SPERRY J S, DONNELLY J R, TYREE M T. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1988, 11(1): 35-40.

[18] TYREE M T, SOBRADO M A, STRATTON L J, *et al.* Diversity of hydraulic conductance in leaves of temperate and tropical species: Possible causes and consequences[J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 1999, 11(1): 47-60.

[19] VENTURAS M D, MACKINNON E D, JACOBSEN A L, *et al.* Excising stem samples underwater at native tension does not induce xylem cavitation[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2015, 38(6): 1060-1068.

[20] VAN IEPEREN W, VAN MEETEREN U, VAN GELDER H. Fluid ionic composition influences hydraulic conductance of xylem conduits [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 769-776.

[21] WANG R Q, ZHANG L L, ZHANG S X, *et al.* Water relations of *Robinia pseudoacacia* L.: Do vessels cavitate and refill diurnally or are R-shaped curves invalid in *Robinia*? [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2014, 37(12): 2667-2678.

[22] LIANG J S, ZHANG J H. Collection of xylem sap at flow rate similar to *in vivo* transpiration flux[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1997, 38(12): 1375-1381.

[23] MELICHEROVÁ N, GLOSER V, SKALÁK J, *et al.* A new device for online nanoscale sampling and capillary electrophoresis analysis of plant sap composition[J]. *Electrophoresis*, 2023, 45(3): 310-317.

[24] LI S, WANG J, LU S, *et al.* Trade-off between hydraulic safety and efficiency in plant xylem and its influencing factors [J]. *Forests*, 2023, 14(9): 1817.

[25] YAO G Q, NIE Z F, TURNER N C, *et al.* Combined high leaf hydraulic safety and efficiency provides drought tolerance in *Caragana* species adapted to low mean annual precipitation [J]. *The New Phytologist*, 2021, 229(1): 230-244.