

干旱胁迫下不同中间砧嫁接苹果苗的导水特性

张林森^{1,*}, 胥生荣², 张永旺¹, 胡景江³, 刘富庭¹, 李雪薇¹, 韩明玉¹,
马锋旺¹

(¹西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; ³西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以基砧为八棱海棠的 4 种不同中间砧嫁接的苹果幼苗长富 2 号/八棱海棠、长富 2 号/M₉、长富 2 号/M₂₆、长富 2 号/SH₆ 为试验材料, 研究干旱胁迫对其导水特性的影响。结果表明: 在干旱胁迫下, 4 种中间砧木嫁接苗的整体、冠层、茎干、根系叶比导水率均有减小, 各器官叶比导水率基本趋势是乔化 > 半矮化 > 矮化, 其中矮化中间砧的变化幅度最大, 乔化中间砧的变化最小。中间砧嫁接接口导水阻力表现为矮化砧比半矮化、乔化砧高, 在正常水分条件下, 八棱海棠、M₉、M₂₆ 和 SH₆ 中间砧嫁接区域导水阻力在植株总体导水阻力中所占的比率分别为 4.07%、6.60%、4.97% 和 5.11%, 当受到干旱胁迫后, 嫁接区域所占比率均有不同程度减小。由于矮化苗有效导水率长期低下, 根系吸水 and 运输水分的能力下降, 导致地上部分水分供给减少, 从而影响树体的生长。

关键词: 苹果; 嫁接; 干旱; 砧木; 水力学特性

中图分类号: S 661.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 11-2137-07

Hydraulics Characteristic of Fuji Apple Grafted on Different Dwarf Interstocks Under Drought Stress

ZHANG Lin-sen^{1,*}, XU Sheng-rong², ZHANG Yong-wang¹, HU Jing-jiang³, LIU Fu-ting¹, LI Xue-wei¹,
HAN Ming-yu¹, and MA Feng-wang¹

(¹College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ²College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; ³College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Fuji apple tree grafted on four types of interstocks [seedling *Malus robusta* (Carr.) Rehd., dwarfing M₉, semi-dwarfing M₂₆ and SH₆] with seedling *Malus robusta* (Carr.) Rehd. were used to study the response of hydraulics characteristic to drought stress. The results showed that the leaf specific conductivity (K_l) of total plant, canopy, stem and root decreased with increasing drought stress, the trend of leaf specific conductivity (K_l) of each organ decreased in the order of seedling, semi-dwarfing and dwarfing, in which the range of change of dwarfing M₉ was largest, and seedling was smallest. Hydraulics resistance of interstock graft union varied as follows: dwarfing trees > semi-dwarfing trees > seedling. The ratio of hydraulic conductance resistance of dwarfing rootstock graft union to plant in seedling, interstock

收稿日期: 2013-05-23; **修回日期:** 2013-09-17

基金项目: 农业部公益性行业专项 (Nyhyzx07-024); 陕西省科技厅重大攻关项目 (2011KTZB02-02-05); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-28)

* E-mail: linsenzhang@163.com

M₉, M₂₆ and SH₆ were 4.07%, 6.60%, 4.97% and 5.11% respectively under well-watered conditions, and decreased under increasing levels of drought stress. Dwarfing rootstock may block transportation of water to the canopy and limit vegetative growth, thus creating the dwarfing effect.

Key words: apple; graft; drought stress; rootstock; hydraulics characteristics

干旱是制约农业生产的重要因素,直接影响着西北干旱半干旱地区苹果产业的发展,因此了解树木水分吸收、运输和利用机理,对提高果树水分利用效率,解决西北地区苹果产业发展的瓶颈问题尤为重要。干旱引起木质部导管形成栓塞(Tyree & Zimmermann, 2002),使水分运输能力降低,进而影响树木生长。

矮砧集约栽培是现代苹果生产发展的趋势,在半干旱地区发展的关键是要选择适宜的砧穗组合。有研究认为,树木矮化是由于砧木嫁接不亲和(Simons, 1986),导致树木导水阻力变大(Olien & Lakso, 1986; Higgs & Jones, 1990)而影响了植株水分运输速率;Kamboj等(1997)研究认为树木矮化是由于砧木叶比导水率降低,使冠层水势和气体交换速率降低而影响了随后的生长。

在西北干旱半干旱地区,了解干旱胁迫对不同砧木嫁接苗各器官导水特性的影响,对研究砧木矮化机理、提高水分利用效率,促进苹果产业健康发展有积极作用。矮化中间砧是苹果矮砧利用的主要方式之一,但目前对不同苹果中间砧苗导水特性的研究很少。本试验中选择4种矮化特性不同的苹果中间砧嫁接苗作为试验材料,同时结合不同程度干旱胁迫,利用高压流速仪(high pressure flow meter, HPFM)直接有效测定树木各器官导水阻力,了解不同器官导水阻力的变化规律,以期从导水方面来解释砧木矮化机理和砧穗组合评价提出一些理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

试验于2012年7月在陕西省杨陵区官村苹果产业技术体系示范苗圃防雨棚内进行。该园地位于34°18'N, 108°04'E,海拔543 m,年平均气温12.9 °C,年日照2 196 h,年降水量660 mm,属大陆性暖温带季风气候。

供试材料接穗品种为2年生生长富2号苹果,基础为八棱海棠,中间砧木分别为半矮化砧木M₂₆、SH₆和矮化砧木M₉,在对照乔化苗中嫁接八棱海棠接穗(Seedling),以代替中间砧木嫁接位置。中间砧长度均为30 cm。2009年春季播种八棱海棠层积好的种子,同年8月中旬,在当年生生长基本一致的八棱海棠实生苗上嫁接中间砧木和八棱海棠,次年8月嫁接长富2号接穗。2011年春芽苗定植于直径30 cm、高45 cm的塑料盆中,每盆1株。盆栽土为充分混匀的苗圃熟土,过筛后与细沙、育苗基质按3:1:1的比例混匀。

1.2 干旱处理

采用盆栽控水法对供试树苗进行干旱胁迫处理,盆的外部包有反光膜,防止土壤温度过高。选择各类型生长一致的树苗进行控水处理,设3个水分梯度。正常水分供应(normal water, NW):土壤含水量为田间持水量的70%~75%;中度干旱胁迫(moderate drought, MD):土壤含水量为田间持水量的50%~55%;重度干旱胁迫(severe drought, SD):土壤含水量为田间持水量的40%~45%。每处理重复5株,每重复1株,采用随机区组排列。所有供试材料的栽培、施肥、病虫害防治处理均相同。当各水分梯度(土壤含水量)到达设定值后继续处理10 d,待供试苗木生理状况稳定时取

样测定相关指标。

1.3 植株株高、茎干直径和叶面积的测定

植株的茎干基部直径用精度为 0.1 mm 的数字游标卡尺测定；株高等用精确度为 1 mm 的刻度尺测定；叶面积测定用 Li-3000C（美国）便携式叶面积仪测定。

1.4 植株导水阻力的测定

不同程度持续干旱处理使植株生理状况相对稳定时，选择生长状况相对一致的苗木利用高压流速仪（high pressure flow meter, HPFM-Gen3, Dynamax 公司，美国）测定植株冠层、根系等各器官的导水阻力。导水阻力的测量依照 Tyree 等（1995）描述的方法。每次测定冠层导水阻力时，从植株基砧与中间砧嫁接接口以下 5 cm 处剪下，迅速连接到 HPFM 上进行测定，得到冠层导水阻力 R_{canopy} ；测完后再从中间砧与接穗间嫁接接口以上 5 cm 处剪开，将长富 2 号接穗连接到 HPFM 上测定剩余部分冠层导水阻力 R_{scion} ，然后去除叶片测得接穗茎干导水阻力 $R_{\text{scion/stem}}$ ；根系导水阻力 (R_{root}) 测定时直接将根茎顶端切口连接在 HPFM 上用同样的方法测定。

植株的导水阻力可以矢量运算 (Gascó et al., 2007)，嫁接区域（包括中间砧和两端嫁接接口处共计 40 cm）的导水阻力为 $R_{\text{graft}} = R_{\text{canopy}} - R_{\text{scion}}$ ；地上部茎干导水阻力为 $R_{\text{stem}} = R_{\text{canopy}} - (R_{\text{scion}} - R_{\text{scion/stem}})$ ；植株整体导水阻力为 $R_{\text{plant}} = R_{\text{canopy}} + R_{\text{root}}$ 。绝对导水率 (K_h) 与相应的导水阻力互为倒数 ($K_h = 1/R$)。

叶比导水率 (the leaf special conductivity, K_l) 是用绝对导水率 (K_h) 除以茎段上所支持的叶面积 (S_{leaf}) 的比率 ($K_l = K_h/S_{\text{leaf}}$)。植株各器官的叶比导水率是其绝对导水率 (K_h) 与其上部所支持的叶面积 (S_{leaf}) 的比率。

试验数据利用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行分析，作图用 SigmaPlot 10.0 软件。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对整个植株的叶比导水率的影响

4 种中间砧嫁接苗随着干旱胁迫的加剧，植株整体叶比导水率 ($K_{l, \text{plant}}$) 均有不同程度降低 (图 1)。在正常水分条件下，乔化苗的植株叶比导率最高，平均值为 $19.61 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ，而 M_9 嫁接苗的植株叶比导率最低，平均为 $13.23 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ，为对照乔化苗叶比导率的 67.5%；重度干旱后， M_9 中间嫁接苗的植株叶比导率仅为对照乔化苗的 44.2%。干旱胁迫使植株整体叶比导率变化最大的为 M_9 嫁接苗，在中度干旱和重度干旱时分别减小到原来的 42.4% 和 13.8%，而变化最小的乔化苗分别减小到原来的 54.1% 和 21.1%。其余两种半矮化苗的植株叶比导率在不同环境条件下均介于乔化苗和 M_9 嫁接苗之间。

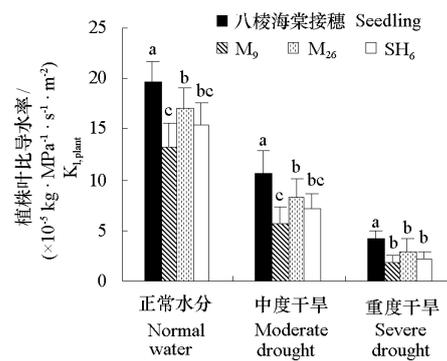


图 1 干旱对中间砧嫁接苹果苗整体植株叶比导水率 ($K_{l, \text{plant}}$) 的影响

Fig. 1 Effects of drought stress on the leaf special conductivity of plant ($K_{l, \text{plant}}$) in interstock grafted apple trees

2.2 干旱胁迫下冠层与嫁接区域的叶比导率

随着干旱胁迫的加剧,嫁接苗冠层和嫁接区域的叶比导率($K_{l,canopy}$, $K_{l,graft}$)均有不同程度地降低(图2)。在正常水分状态下,乔化苗的 $K_{l,canopy}$ 和 $K_{l,graft}$ 最高,分别为 2.95 和 $32.26 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, M_9 嫁接苗最低,分别为 2.03 和 $21.32 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$;干旱胁迫后,虽然各导水率均有减小,但仍然是乔化苗的最高, M_9 嫁接苗的最低。干旱胁迫后,乔化苗冠层叶比导率的变化最小,在中度和重度胁迫时分别减小到正常状态的52.5%和23.2%,而 M_9 冠层叶比导率变化最大;乔化苗嫁接区域叶比导率变化最小,中度和重度胁迫时分别减小到正常状态的59.6%和28.4%,而 M_9 嫁接区域叶比导率变化最大,中度和重度胁迫时分别减小到正常状态的53.8%、20.5%。

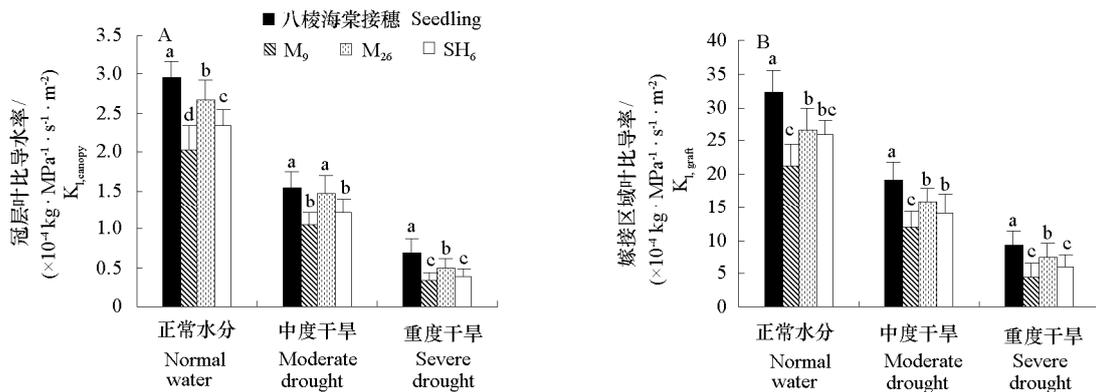


图2 干旱胁迫对中间砧嫁接苹果苗冠层(A)和嫁接区域(B)叶比导率的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on the leaf special conductivity of canopy (A) and inter-rootstock graft union (B) in interstock grafted apple trees

2.3 嫁接区域导水阻力在冠层导水阻力和植株导水阻力中的比率

图3, A、B分别是嫁接区域导水阻力(R_{graft})在冠层导水阻力(R_{canopy})和植株导水阻力(R_{plant})中所占的比率。在正常水分条件下,乔化苗和中间砧 M_9 、 M_{26} 、 SH_6 的嫁接苗中,嫁接区域导水阻力(R_{graft})在冠层导水阻力(R_{canopy})中所占的比率分别为:7.16%和11.40%、9.36%、10.02%,在

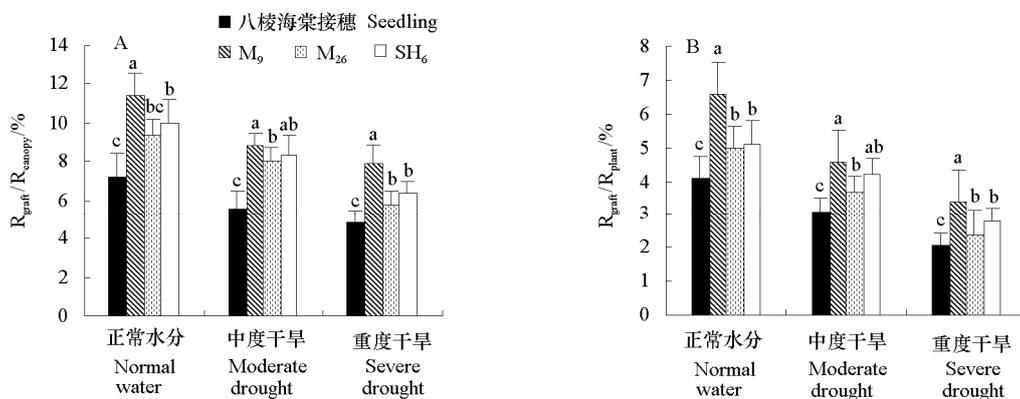


图3 干旱对中间砧嫁接苗嫁接区域导水阻力在冠层(A)和整体植株(B)导水阻力中所占比率的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on the ratio of hydraulic conductance resistance of dwarfing rootstock graft union to canopy (A) and plant (B)

植株总体导水阻力中所占的比率分别为：4.07%和 6.60%、4.97%、5.11%，均以矮化砧 M₉ 最高，当受到干旱胁迫后，嫁接区域导水阻力所占比率均有不同程度的减小；M₉ 嫁接苗中嫁接区域的导水阻力 (R_{graft}) 在植株整体和冠层中占有的百分率最大。由图 3, A 看出，乔化苗随着干旱胁迫程度的加剧导水阻力所占百分率变化最小，同时在同一水平胁迫下所占的百分率最低，而在 M₉ 嫁接苗导水阻力中百分率最高；由图 3, B 看出，随着干旱胁迫的加剧，嫁接区域的导水阻力 (R_{graft}) 在植株导水阻力 (R_{plant}) 中所占的比率均有降低，而且 M₉ 嫁接苗中度干旱时相对正常水分的变化较其他苗木更显著，而从中度到重度胁迫时变化相对较小。

2.4 不同砧木嫁接苗茎干和根系在不同水分处理下叶比导率

由表 1 可知，不同中间砧木嫁接苗中，茎干叶比导率 ($K_{\text{l,stem}}$) 在相同干旱胁迫水平下最大的均为乔化苗，最小的是 M₉ 嫁接苗。植株的茎干主要组成部分是接穗的木质部，但是由于矮化中间砧对水分流动的限制，使不同植株地上部分水势不一致，从而导致形成栓塞的程度不一样，导水率也出现差异。尽管根系都是八棱海棠基础砧，但中间砧影响水分从地下向地上部分运输，迫使根系水势和木质部结构的变化，从而使根系叶比导率 ($K_{\text{l,root}}$) 在不同嫁接苗中稍不相等。

表 1 干旱对中间砧嫁接苹果苗茎干和根系叶比导率的影响
Table 1 Effects of drought stress on the leaf special conductivity (K_{l}) of stem and root in grafted apple trees

($10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

中间砧木 Interroot stocks	茎干叶比导率 $K_{\text{l,stem}}$ Leaf specific conductivity of stem			根系叶比导率 $K_{\text{l,root}}$ Leaf specific conductivity of root		
	正常水分 Normal water	中度干旱 Moderate drought	重度干旱 Severe drought	正常水分 Normal water	中度干旱 Moderate drought	重度干旱 Severe drought
八棱海棠接穗 Seedling	5.99 ± 0.43 a	3.96 ± 0.31 a	3.56 ± 0.19 a	6.77 ± 0.55 a	3.38 ± 0.34 a	0.44 ± 0.12 ab
M ₉	3.50 ± 0.15 c	2.95 ± 0.26 b	2.41 ± 0.31 c	5.77 ± 0.46 b	3.24 ± 0.32 a	0.37 ± 0.40 b
M ₂₆	4.36 ± 0.37 b	3.05 ± 0.61 b	2.62 ± 0.38 b	6.82 ± 0.84 a	3.20 ± 0.26 a	0.51 ± 0.06 a
SH ₆	3.90 ± 0.54 b	2.99 ± 0.33 b	2.65 ± 0.40 b	6.26 ± 0.46 ab	3.00 ± 0.19 a	0.41 ± 0.06 ab

注：同一列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Values followed by different letter within the same column are significantly different at 0.05 level.

3 讨论

水是植物体生理活动必不可少的物质。Nardini 和 Salleo (2000) 的研究表明，植物通常在接近水分限制点（即导管空穴化）时有最大气孔导度，当超过水分限制点时，植株为了防止大量水分蒸腾散失而影响植株体正常的生理活动，会将叶片气孔关闭。在水分亏缺的情况下，叶片气孔关闭可减少植物体内水分的散失，从而阻碍水势的迅速降低，防止木质部栓塞加剧。木质部导管出现栓塞，会使导水能力降低，严重影响树体水分的分配供给，对树体的生长产生消极的影响。

植株整体的导水率 (K_{l}) 反映植株与环境之间水分吸收、运输的关系。木质部结构和导管分化程度都会影响树体木质部导水能力 (安锋 等, 2005)。随着干旱胁迫程度的加剧，植株整体的叶比导率 ($K_{\text{l,plant}}$) 均有不同程度的降低。在正常水分条件下，M₉ 嫁接苗的叶比导率 ($K_{\text{l,plant}}$) 为乔化苗的 67.5%，减小幅度与王贵平等 (2011) 报道矮化树体冠层减小幅度基本相同；在重度干旱胁迫时仅占乔化苗的 44.2%。由于中间砧的种类不同，使嫁接区域导水阻力不同，导致不同砧木嫁接苗间整体导水能力出现差异。

Simons (1986) 认为砧木引起矮化可能是由于水分在嫁接组合间运输受阻，是由两个有机体之间嫁接不亲和性引起的，但是 Nardini 等 (2006) 没有在不同砧木嫁接区域叶比导率之间发现显著的

不同。本研究发现,在不同的砧木嫁接苗上,接穗嫁接在矮化砧上的叶比导率显著低于嫁接到乔化砧木上。乔化苗的嫁接区域叶比导率最高,矮化能力越强的嫁接苗嫁接区域叶比导率越低,这与冠层叶比导率的变化趋势相一致。由于中间砧木导水能力的降低,使根系吸收的水分不能及时的运输到树冠,从而减小了根系与土壤之间吸收水分的水势差,从而减少水分吸收,加剧植物体内水分供给不足和植物体水势的降低,进而限制植物体的营养生长。

Syvrtsen (1981) 发现在柑橘植株导水阻力升高的位置主要是来自于根系。但是嫁接区域的导水阻力也不可忽视 (Cohen & Naor, 2002; Atkinson et al., 2003; Olmstead et al., 2006)。同样, Nardini 等 (2006) 发现幼年的油橄榄树根系的导水阻力是树体导水阻力的主要组成部分,嫁接区域对植株总体水力学阻力的贡献是很低的。本试验中发现苹果嫁接苗嫁接区域导水阻力是冠层导水阻力的 4.79% ~ 11.40%, 是植株总体导水阻力的 2.09% ~ 6.60%。由此可见,嫁接区域导水阻力并不是植株导水阻力的主要来源,但由于其处于关键部位,很容易影响根系向冠层的水分供给。由于不同组织器官对水分胁迫的敏感性不同,比值会随着水分胁迫的变化而不同。在同一胁迫水平下,矮化能力越强的植株嫁接区域导水阻力所占百分率越大。有解剖学研究 (张新忠 等, 1995) 证明乔化砧木嫁接接口发育正常,矮化砧木嫁接接口内有许多坏死组织,导管形态异常,从而使导水阻力变大,砧木的矮化程度越高,这种情况越严重。由此可以在解剖学方面解释矮化与导水阻力之间的关系。随着干旱胁迫的加剧,乔化苗中嫁接区域导水阻力在冠层中所占的比率变化很小,而在矮化苗上所占百分率变化相对明显。这是由于在乔化苗中嫁接区域木质部结构、敏感性与冠层茎干相似,而矮化砧对干旱胁迫的敏感性与其基础和接穗的敏感性不一致。

Atkinson 等 (2003) 研究发现,接穗嫁接在矮化能力不同的自根砧木上时,矮化植株的根系、茎干和嫁接区域的导水率均低于乔化植株。由于干旱使根组织栓化程度增加从而降低了径向根系导水率,引起根系导水阻力不同程度增大 (姚立民 等, 2011)。有研究 (Landsberg et al., 1976; Shabtai et al., 2007) 发现植株中导水阻力最大的部分在根系,其大约为植株整体导水阻力的一半。本试验中也证明了这一点,随着干旱胁迫的加剧,根系叶比导率 ($K_{l,root}$) 减小幅度最大,同时其叶比导率 ($K_{l,root}$) 为各器官中最小。根系是植株导水阻力的主要来源,而且受干旱胁迫时敏感性最高,即根系的导水特性最易影响到植株整体水分利用状况。本试验材料基砧均为八棱海棠,所以根系的叶比导率 ($K_{l,root}$) 在不同嫁接苗之间差异短期内不是很明显,但由于中间砧导水阻力的差异,使根系吸水的动力,如蒸腾拉力、水分张力不同,从而引起根系吸收和运输水分能力出现差异。

乔化苗、半矮化苗和矮化苗中,树体矮化能力的差异与植株导水率的变化相关。由于中间砧导水特性对干旱胁迫的敏感性不同,乔化苗中嫁接区域导水阻力在冠层中所占的百分率变化很小,而矮化苗嫁接区域导水阻力所占百分率变化相对较大。随着干旱胁迫程度的加剧,矮化能力越强的植株各器官导水率减小越明显,矮化苗嫁接区域导水率比乔化苗相同部位导水率小,由于长期的有效导水率低下,根系吸水和运输水分的能力下降,导致地上部分水分供给的减少,使供应树体正常生理活动的水分亏缺,从而影响树体的生长。矮化砧木引起树体木质部导水率降低可能与木质部导管气穴现象的发生和水孔蛋白表达等有关,因此需要进一步在干旱条件下研究,以及调查导水阻力与矮化砧木及嫁接接口木质部导管内径、密度的解剖结构差异等影响因子的关系。

References

- An Feng, Zhang Shuo-xin, Zhao Ping-juan. 2005. Relations between xylem embolisms and physiological indexes in eight woody plants I. Relationships with xylem water potentials. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia sinica*, 25 (8): 1595 - 1600. (in Chinese)
- 安 锋, 张硕新, 赵平娟. 2005. 8 种木本植物木质部栓塞变化与生理生态指标关系的研究 I. 与植物木质部水势的关系. *西北植物学报*, 25 (8): 1595 - 1600.

- Atkinson C J, Else M A, Taylor L, Dover C J. 2003. Root and stem hydraulic conductivity as determinants of growth potential in grafted trees of apple (*Malus pumila* Mill). *Journal of Experimental Botany*, 54: 1221 - 1229.
- Cohen S, Naor A. 2002. The effect of three rootstocks on water use, canopy conductance and hydraulic parameters of apple trees and predicting canopy from hydraulic conductance. *Plant Cell Environ*, 25: 17 - 28.
- Gascó A, Nardini A, Raimondo F, Gortan E, Motisi A, Lo Gullo M A, Salleo S. 2007. Hydraulic kinetics of the graft union in different *Olea europaeal*. Scion/rootstock combinations. *Environmental and Experimental Botany*, 60: 245 - 250.
- Higgs K H, Jones H G. 1990. Response of apple rootstocks to irrigation in south-east England. *Journal of Horticultural Science*, 65: 129 - 141.
- Kamboj J S, Blake P S, Quinlan J D, Webster A D. 1997. Recent advances in studies on the dwarfing mechanism of apple rootstocks. *Acta Horticulturae*, 451: 75 - 82.
- Landsberg J J, Blanchard T W, Warrit B. 1976. Studies on the movement of water through apple trees. *Journal of Experimental Botany*, 27: 579 - 596.
- Nardini A, Gasco A, Raimondo F, Gortan E, Lo Gullo M A, Caruso T, Salleo S. 2006. Is rootstock-induced dwarfing in olive an effect of reduced plant hydraulic efficiency? *Plant Physiology*, 26: 1137 - 1144.
- Nardini A, Salleo S. 2000. Limitation of stomatal conductance by hydraulic traits: Sensing or preventing xylem cavitation? *Tree*, 128: 327 - 342.
- Olien W C, Lakso A N. 1986. Effect of rootstock on apple (*Malus domestica*) tree water relations. *Physiologia Plantarum*, 67: 421 - 430.
- Olmstead M A, Lang N S, Lang G A, Ewers F W, Owens S A. 2006. Examining the vascular pathway of sweet cherries grafted onto dwarfing rootstocks. *HortScience*, 41: 674 - 679.
- Shabtai Cohen, Amos Naor, John Bennink, Avraham Grava, Melvin Tyree. 2007. Hydraulic resistance components of mature apple trees on rootstocks of different vigours. *Journal of Experimental Botany*, 58 (15/16): 4213 - 4224.
- Simons R K. 1986. Graft-union characteristics as related to dwarfing in apple (*Malus domestica* Borkh.). *Acta Hort*, 160: 57 - 66.
- Syvtersten J P. 1981. Hydraulic conductivity of four commercial citrus rootstocks. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106: 378 - 381.
- Tyree M T, Patino S, Bennink J, Alexander J. 1995. Dynamic measurements of root hydraulic conductance using a high-pressure flow meter in the laboratory and field. *Journal of Experimental Botany*, 46: 83 - 94.
- Tyree M T, Zimmermann M. 2002. Xylem structure and the ascent of sap. 2nd ed. Berlin: Springer.
- Wang Gui-ping, Wang Jin-zheng, Xue Xiao-min, Zhang Ming-yong, Lu Chao, Nie Pei-xian. 2011. Evaluation report of apple trees production on M9 self-rooted and M26 dwarfing interstock. *Shandong Agricultural Sciences*, 11: 41 - 43. (in Chinese)
- 王贵平, 王金政, 薛晓敏, 张明勇, 路超, 聂佩显. 2011. 苹果 M9 自根砧、M26 中间砧生产评价报告. *山东农业科学*, 11: 41 - 43.
- Yao Li-min, Li Fu-sheng, Shen Xiao-jun, Tong Ling. 2011. Research progress on soil factors affecting root hydraulic conductance. *Journal of Northwest A & F University: Nat Sci Ed*, 39 (5): 65 - 72. (in Chinese)
- 姚立民, 李伏生, 申孝军, 佟玲. 2011. 土壤因素对根系导水率影响的研究进展. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 39 (5): 65 - 72.
- Zhang Xin-zhong, Zhang De-ming, Zhang Jian-ge, Bai Jing-chun. 1995. Anatomical studies on graft union of apple trees on dwarfing and standard rootstock. *Acta Horticulturae Sinica*, 22 (2): 117 - 122. (in Chinese)
- 张新忠, 章德明, 张建阁, 白景春. 1995. 矮砧及乔砧苹果树嫁接口的解剖观察. *园艺学报*, 22 (2): 117 - 122.