曹市一,张运煜,袁英华,等.油茶苗期解剖结构及水养特征对缺钾响应的砧穗效应[J].江西农业大学学报,2026,48(3):772-784.
Cao S Y,Zhang Y Y,Yuan Y H,et al.Rootstock-scion interaction on anatomical structure and hydronutrient characteristics of grafted camellia seedlings in response to potassium deficiency[J].Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2026,48(3):772-784.

油茶苗期解剖结构及水养特征对缺钾响应的砧穗效应

曹市一[1],张运煜[2],袁英华[3],刘　娟[1],游　璐[1],储双双[1],胡冬南[1*]

(1.江西农业大学 亚热带森林资源培育江西省重点实验室/林学院,江西 南昌 330045;2.新余市林业发展服务中心,江西 新余 338000;3.江西省永丰县古县林场,江西 吉安 331507)

摘要:【目的】从解剖结构、钾养分积累及水势层面探究芽苗砧嫁接油茶(*Camellia oleifera*)苗期对缺钾响应的砧穗效应,为油茶钾素吸收利用调控及砧木选择提供理论指导。【方法】试验设置施钾(K1:6 mmol/L)和缺钾(K0:0 mmol/L)2种钾水平处理,以同砧不同穗和同穗不同砧(赣8/赣无2、赣无1/赣无2、赣无2/赣无2、赣无2/赣8、赣无2/赣无1)的5个一年生油茶嫁接苗为试验材料进行盆栽试验,通过定期取样观察测定茎叶解剖结构、钾养分含量及水势,分析不同砧木或穗条的嫁接油茶对缺钾的响应差异。【结果】(1)油茶苗期叶片各组织厚度对缺钾的响应不仅与穗条品种有关,同样受砧木品种的影响,赣8无论做砧木还是穗条、嫁接体叶片各组织均是不施钾时更厚;赣无1则是施钾情况下更厚;茎解剖结构对缺钾的响应与穗条品种关系更密切,缺钾利于赣8穗条组合茎和髓直径增粗,11月份时较K1处理分别增大11.29%和47.70%,而另2个穗条组合则是缺钾处理明显较施钾处理小。(2)缺钾整体影响嫁接苗茎、叶对钾养分的积累。对叶钾含量的影响程度由穗条品种决定,与砧木品种无关,赣8、赣无1穗条组合K0处理的叶钾含量较K1处理显著下降37.8%和30.7%,而赣无2穗条组合则K0与K1处理差异不明显。缺钾对茎钾含量的影响不仅与穗条有关,也因砧木不同而异。缺钾条件下,赣无1砧木组合和穗条组合5月份茎钾含量分别较K1显著下降36.9%和40.7%;赣8和赣无2无论作砧木还是穗条嫁接,苗期茎钾含量受缺钾的影响均不显著。(3)缺钾使各组合油茶苗的清晨水势增强,对正午水势的影响较小。穗条品种是决定油茶苗水分响应的核心,赣8穗条组合对缺钾更敏感,其清晨水势在5月和11月较K1明显更高,增幅分别达67.86%和45.82%;砧木品种差异对缺钾的水势响应差异相对更小。【结论】油茶嫁接苗苗期对缺钾的响应存在砧、穗效应,叶片解剖结构、茎钾含量对缺钾的响应受穗条和砧木共同主导,叶片钾含量、茎解剖结构、水分生理(水势)的响应程度主要由穗条品种主导。建议油茶养分管理中既要关注穗条品种特性差异,也要重视嫁接砧木品种的影响。

关键词:油茶;缺钾胁迫;砧穗效应;解剖结构;水养特征
中图分类号:S794.4　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2026)03-0772-13
CSTR:32399.14.aauj.2026064

收稿日期:2025-11-24　　**修回日期:**2026-02-22　　**接受日期:**2026-02-28
基金项目:国家自然科学基金项目(32060362)和江西省林业局科技创新项目(创新项目〔2025〕30号)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32060362)and Science and Technology Innovation Program from Forestry Administration of Jiangxi Province(Innovation Project No. 30 [2025])
作者简介:曹市一,硕士生,orcid.org/0009-0004-1117-7845,18879241248@163.com;*通信作者:胡冬南,教授,博士,主要从事经济林栽培与良种繁育研究,orcid.org/0000-0003-2973-6436,dnhu98@163.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Rootstock-scion interaction on anatomical structure and hydronutrient characteristics of grafted camellia seedlings in response to potassium deficiency

Cao Shiyi[1], Zhang Yunyu[2], Yuan Yinghua[3], Liu Juan[1], You Lu[1], Chu Shuangshuang[1], Hu Dongnan[1*]

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Xinyu Forestry Development Service Center, Xinyu, Jiangxi 338000, China; 3. Guxian Forest Farm of Yongfeng County Jiangxi Province, Ji'an, Jiangxi 331507, China)

Abstract: [**Objective**] This study explores the rootstock-scion effect on the response to potassium deficiency in grafted *Camellia oleifera* seedlings from the perspectives of anatomical structure, potassium nutrient accumulation, and water potential, providing theoretical guidance for regulating potassium absorption and utilization in oil tea as well as for selecting and using rootstocks. [**Method**] Two potassium treatments were designed: potassium application (K1: 6 mmol/L) and potassium deficiency (K0: 0 mmol/L). Potted experiments were carried out using five one-year-old grafted *Camellia oleifera* seedlings with either the same rootstock and different scions or the same scion and different rootstocks (Gan 8/Gan Wu 2, Gan Wu 1/Gan Wu 2, Gan Wu 2/Gan Wu 2, Gan Wu 2/Gan 8, Gan Wu 2/Gan Wu 1) as experimental materials. Regular sampling was conducted to observe and measure stem and leaf anatomical structure, potassium content, and water potential, in order to analyze the response differences of grafted *Camellia oleifera* with different rootstocks or scions to potassium deficiency. [**Result**] (1) The response of tissue thickness in the leaves of tea-oil seedlings during the seedling stage to potassium deficiency is not only related to the scion variety but also affected by the rootstock variety. For Gan 8, whether used as a rootstock or scion, the tissues of the grafted seedlings' leaves are thicker when no potassium is applied, whereas for Gan Wu 1, the tissues are thicker under potassium application. The anatomical structure of the stem responds to potassium deficiency more closely depending on the scion variety. Potassium deficiency promotes an increase in stem and pith diameter in Gan 8 scion combinations, with diameters in November being 11.29% and 47.70% larger than those under the K1 treatment, whereas in the other two scion combinations, the diameters under potassium deficiency are significantly smaller than with potassium application. (2) Potassium deficiency overall affects the accumulation of potassium nutrients in the stems and leaves of grafted seedlings. The effect on leaf potassium content is determined by the scion variety and is not related to the rootstock variety. In Gan 8 and Gan Wu 1 scion combinations, leaf potassium content under K0 treatment is significantly reduced by 37.8% and 30.7% compared to K1 treatment, while in Gan Wu 2 scion combination, the difference between K0 and K1 treatments is not significant. The effect of potassium deficiency on stem potassium content is related not only to the scion but also varies with different rootstocks. Under potassium deficiency, the stem potassium content in May for Gan Wu 1 rootstock and scion combinations decreased significantly by 36.9% and 40.7% compared to K1, whereas for Gan 8 and Gan Wu 2 used as either rootstock or scion, stem potassium content during the seedling stage was not significantly affected. (3) Potassium deficiency enhances the predawn water potential in all combinations of tea-oil seedlings, while its effect on midday water potential is smaller; the scion variety is the key factor determining the water response of tea-oil seedlings. Gan 8 scion combinations are more sensitive to potassium deficiency, with predawn water potential in May and November being significantly higher than K1, increasing by 67.86% and 45.82%, respectively; differences in rootstock varieties have relatively smaller effects on water potential responses to potassium deficiency. [**Conclusion**] The response of grafted *Camellia oleifera* seedlings to potassium deficiency during the seedling stage shows both rootstock and scion

effects. The response of leaf anatomical structure and stem potassium content to potassium deficiency is jointly influenced by the scion and rootstock, whereas the response of leaf potassium content, stem anatomical structure, and water physiology (water potential) is mainly dominated by the scion variety. It is recommended that nutrient management of tea-oil plants should consider the differences in scion variety characteristics while also paying attention to the influence of the grafted rootstock varieties.

Keywords: *Camellia oleifera*; potassium deficiency stress; rootstock-scion effect; anatomical structure; hydroponic traits

【研究意义】油茶(*Camellia oleifera*)为山茶科山茶属木本食用油料树种之一[1]。主要分布于我国湖南、江西、广西等南方省份,因其兼具显著的生态、经济和社会效应得以大面积栽植。芽苗砧嫁接是目前油茶繁殖利用的主要方式,能较好保持油茶优良性状,但也可能存在砧穗效应问题。已有研究初步表明,油茶幼苗的生长会受到砧穗互作的影响[2]。砧木的不同会导致同林分同品种油茶产量出现较大差异[3]。芽苗砧嫁接植株的根系由砧木提供,而根系作为植物重要的组成部分,能参与养分和水分的吸收[4],砧穗效应在经济树种上很常见,不同砧木在叶片解剖结构上存在显著差异[4],使得响应部位各组织的厚度出现不同变化。【前人研究进展】Zhang等[5]研究表明,砧木的不同会显著影响核桃的产量和接穗的生长。砧木能够影响接穗的生理特性和表型特征。接穗也会因代谢产物运输的不同和砧穗间亲和性等的不同,对砧木地下部分根系生长有一定程度的影响[4-5]。

【本研究切入点】钾是植物生长发育不可缺少的元素,当植物受到缺钾胁迫,植物的新陈代谢受到严重影响,叶片碳水化合物的积累量增加[5]。我国土壤钾主要以矿物态存在,有效钾含量偏低,导致植物体内钾含量不足,这已成为目前产品质量欠佳的重要原因[6]。胡冬南等[7]研究表明,磷、氮、钾、钙、镁为江西油茶林土壤养分的主要限制因子,而硼、锌、铜为次要或者潜在限制因子。南方红壤供钾能力较弱,缺钾是限制油茶产量和质量的主要原因之一。张文元等[8]研究表明,缺钾会降低油茶果实产量和品质,可见钾对油茶生长发育非常重要,但目前的研究均没有考虑砧木以及砧穗互作对油茶耐缺钾能力的影响。【拟解决的关键问题】研究以不同油茶品种为材料进行砧穗嫁接,在正常施钾(K1)和缺钾处理(K0)下开展盆栽对比试验,跟踪调查不同砧穗组合油茶器官解剖的微观结构及水分养分特征,探讨嫁接植株形态解剖及水养特征对缺钾响应的砧穗效应,为耐低钾砧木和穗条品种的选择利用提供理论指导,对推动油茶产业发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西农业大学中药园,属亚热带季风气候,试验当年平均气温为19.3 ℃,年平均降水量1 676.3 mm。试验地地势平坦,灌溉设施完善。

1.2 试验材料

以赣8(G8)、赣无2(GW2)、赣无1(GW1)油茶为材料,设计同砧不同穗和同穗不同砧共5个芽苗砧嫁接组合(G8/GW2、GW1/GW2、GW2/GW2、GW2/G8、GW2/GW1),2022年5月中旬嫁接并培植于轻基质容器中。2022年12月选择生长良好且较为一致的油茶苗移入20 cm×17 cm的塑料种植盆进行沙培,每盆沙量4.0 kg,盆底放塑料托盘防止营养液外溢。河砂含速效钾(3.02±0.63)mg/kg、有效磷(0.91±0.37)mg/kg、速效氮(22.87±8.28)mg/kg。

1.3 试验设计

基于课题组前期研究[9],对上述5个嫁接组合分别设置施钾(K1:6 mmol/L)和缺钾(K0:0 mmol/L)2种钾水平处理,每个组合每种处理重复3次,每个重复25株,共750株苗。试验钾源为磷酸二氢钾,其他养分使用改良霍格兰营养液[9]提供,营养液的pH值调整至5.2。2023年3月上旬开始施肥,每2周浇灌一次,每株300 mL,共15次,施钾处理总计施钾量相当于每株1 g,缺钾处理为每株0 g。试验过程中依据失水情况及时补水。

1.4　样品采集及测定

1.4.1　茎叶解剖结构观察

于2023年3月上旬(施肥前)、5月中旬以及11月下旬取样。每个重复各选择3株油茶苗,采集新鲜完整的功能叶片和茎用于解剖。以叶中脉距叶尖的三分之一长度处为中点,用刀片垂直于叶脉切出1 cm^2的叶片方块,茎取嫁接口上部4.5~5 cm处的茎段,将茎叶制成永久切片,使用植物显微成像系统(Nikon CL-L,Nikon,日本)观察拍摄,并使用Image J软件测量叶片厚度、叶片上表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度以及叶片下表皮厚度,每处厚度的测量均选取切片视野中的3个垂直于叶片上表皮的位置,详见图1。茎切片同样使用植物显微成像系统观察拍摄,用Image J软件测量茎直径、穗直径、木质部厚度以及韧皮部厚度。每个切片测量时,选取茎剖面中最长直径方向及与其垂直的方向分别进行测量然后将二者取平均值记录,详见图2。

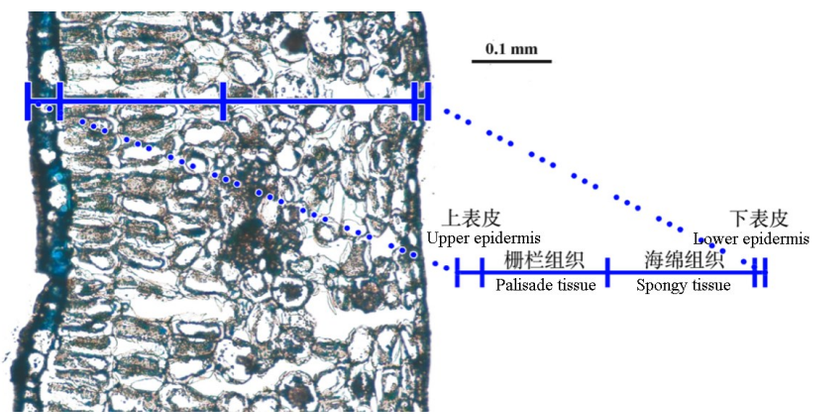


图1　油茶叶片解剖结构及测量方法

Fig.1　Anatomical structure and measurement method of *Camellia oleifera* leaves

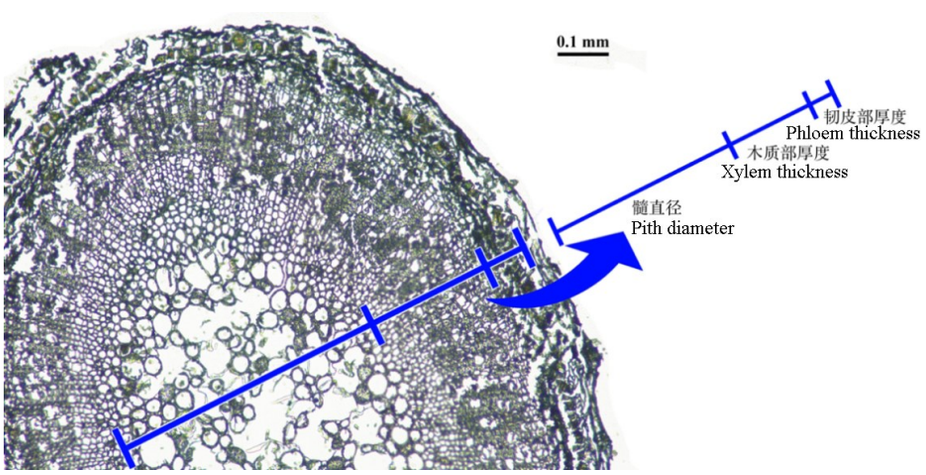


图2　油茶茎解剖结构及测量方法

Fig.2　Anatomical structure and measurement method of *Camellia oleifera* stem

1.4.2　水势参数测定

水势指标测定时间同1.4.1。在当天06:00前测定清晨水势,10:30—13:30测定正午水势,测定时各处理取3株完整且组织未受破坏的油茶苗。用刀片从砧嫁接口上方0.5 cm处斜向切开植株,并将地上部分放入数字式植物压力室(SKPM1400,Skye,Britain)中封闭并加压,当茎部剖面冒出第1个水泡时迅速记录压力数值,将该值记为负值即为水势。

1.4.3　钾养分测定

养分元素测定取样时间及处理同1.4.1。每一株的叶、茎烘干称重后,分别磨碎过筛,装入自封袋用于养分元素测定。养分采用联合消煮法测定,先称取各组织样品0.100 0 g置于消煮管中,向内加入2~3 mL的水,再加入5 mL浓硫酸,摇匀后静置。使用石墨消解仪消煮,消煮过程中每15 min加入3 mL过氧化氢

溶液，直到消煮液透明亮白，消煮后将溶液倒入 100 mL 容量瓶，定容后静置澄清[11]。澄清后用火焰光度计（F-100，Metash，China）测定样品中的全钾含量。

1.5 数据统计与分析

采用 Excel 2018 录入数据并归纳整理，进行显微指标测量；利用 SPSS 进行方差分析；使用 Origin 2023 绘图。

2 结果与分析

2.1 油茶苗解剖学特征对缺钾响应的砧穗效应

2.1.1 叶片解剖结构

同砧不同穗组合的油茶叶片解剖结构统计结果（表 1）表明，赣无 1、赣无 2 穗条的叶片各指标厚度均显著大于赣 8 穗条组合，3 月份试验处理前分别厚 111.22%、117.33%，赣无 1、赣无 2 穗条的差异不明显。随着油茶生长，叶片逐渐增厚，但 3 种穗条组合对缺钾的响应不同。缺钾处理使赣 8 穗条组合叶片各指标变厚，11 月份时，叶片厚度、上表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度较 K1 处理分别厚 28.29%、30.09%、59.53% 和 14.47%；赣无 1 穗条组合则相反，缺钾处理叶片各指标厚度均较 K1 处理薄，11 月份时，K0 处理的叶片厚度、上表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度分别比 K1 处理的薄 16.91%、51.08%、21.95%、11.28%；赣无 2 本砧的叶片厚度对缺钾响应相对不敏感，除 11 月份 K0 处理的栅栏组织明显较 K1 处理的厚外，其他指标的差异均未达到显著水平。

表 1 同砧不同穗油茶苗叶片厚度

Tab.1 Thickness of *Camellia oleifera* leaves with the same rootstock and different scions μm

组合 Scion	月份 Month	处理 Treatment	叶片 Blade	上表皮 Upper epidermis	栅栏组织 Palisade mesophyll	海绵组织 Sponge tissue	下表皮 Lower epidermis
赣 8/赣无 2 G8/GW2	3 月	–	152.03±5.19^{g}	8.45±2.16^{e}	50.99±5.41^{g}	85.14±11.06^{i}	7.45±1.99^{e}
	5 月	K1	239.97±8.26^{f}	15.77±0.63^{d}	75.77±2.05^{f}	135.01±6.01^{h}	13.42±0.65^{de}
		K0	290.70±7.41^{e}	19.31±1.57^{bc}	104.51±2.92^{e}	152.97±3.21^{gh}	13.90±1.37^{de}
	11 月	K1	298.60±15.70^{e}	21.62±1.76^{c}	90.28±7.14^{ef}	168.61±13.42^{g}	18.09±1.28^{c}
		K0	383.14±9.33^{c}	28.16±1.92^{b}	143.90±11.11^{cd}	193.06±1.55^{ef}	18.02±2.14^{c}
赣无 1/赣无 2 GW1/GW2	3 月	–	321.11±22.56^{d}	20.71±4.80^{c}	98.85±4.13^{e}	188.89±25.87^{f}	12.66±2.06^{de}
	5 月	K1	421.76±14.38^{b}	29.01±1.20^{b}	145.02±3.57^{bc}	228.64±8.98^{abcd}	19.09±1.74^{c}
		K0	379.64±10.12^{c}	22.51±1.08^{c}	127.04±4.85^{d}	211.42±4.78^{de}	18.67±0.62^{c}
	11 月	K1	488.85±10.02^{a}	34.91±3.87^{a}	179.42±2.53^{a}	250.50±5.45^{a}	24.02±2.70^{b}
		K0	418.67±25.72^{b}	23.13±1.27^{c}	147.11±8.74^{bc}	225.17±20.33^{cd}	23.26±1.87^{b}
赣无 2/赣无 2 GW2/GW2	3 月	–	330.40±13.04^{d}	20.66±2.65^{c}	93.87±7.63^{e}	199.91±7.96^{ef}	15.97±1.42^{cd}
	5 月	K1	414.57±6.87^{b}	28.75±0.96^{b}	132.33±5.18^{cd}	231.25±6.19^{abcd}	22.25±0.54^{b}
		K0	419.77±10.23^{b}	31.10±0.78^{b}	142.63±8.74^{cd}	227.87±1.32^{bcd}	18.17±0.61^{c}
	11 月	K1	470.68±4.46^{a}	34.69±2.89^{a}	161.48±20.64^{b}	247.61±14.16^{ab}	26.9±2.16^{a}
		K0	479.35±8.62^{a}	39.13±2.82^{a}	180.71±20.37^{a}	240.36±15.47^{abc}	19.14±2.53^{c}

不同小写字母表示各嫁接组合及钾水平处理在 5% 水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences among months and treatments at the 5% level.

同穗不同砧的 3 个组合叶片厚度对缺钾响应也明显不同（表 2）。缺钾使赣 8 砧木组合叶片增厚，5 月份和 11 月份时均明显大于 K1 处理；赣无 1 砧木组合则是 K0 处理小于 K1 处理。11 月份时，不施肥的 K0 处理中，叶片各指标厚度均以赣无 1 砧木组合的明显更小，而 K1 处理中则是赣 8 砧木组合明显更小。说明油茶苗生长期间叶片各组织厚度对低钾的响应不仅与穗条的品种有关，同样受砧木品种的影响，赣 8 无论做砧木还是穗条，其嫁接体的叶片各组织均是不施钾时更厚，而赣无 1 则是施钾情况下更厚。

表 2　同穗不同砧油茶苗叶片厚度

Tab.2　Thickness of *Camellia oleifera* leaves with the same scions and different rootstocks　　μm

组合 Scion	月份 Month	处理 Treatment	叶片 Blade	上表皮 Upper epidermis	栅栏组织 Palisade mesophyll	海绵组织 Sponge tissue	下表皮 Lower epidermis
赣无 2/赣 8 GW2/G8	3 月	–	399.40±13.80^{def}	33.42±3.40^{cde}	103.98±0.62^{g}	240.57±9.64^{b}	21.42±4.37^{bcd}
	5 月	K1	411.80±4.29^{de}	28.95±1.60f^{g}	122.07±1.74^{fg}	236.53±3.36^{b}	24.26±2.09^{abc}
		K0	486.90±13.45^{b}	36.21±1.07^{abc}	153.70±4.33^{cd}	272.62±9.96^{a}	24.37±2.32^{abc}
	11 月	K1	420.08±5.36^{d}	25.78±2.53^{g}	134.64±8.72^{def}	233.45±4.97^{b}	26.20±3.39^{ab}
		K0	545.24±13.30^{a}	37.22±2.42^{ab}	192.40±22.93^{a}	289.63±18.39^{a}	25.99±3.06^{ab}
赣无 2/赣无 1 GW2/GW1	3 月	–	374.64±9.93^{g}	30.00±1.42^{ef}	125.79±14.12^{efg}	198.61±12.97^{c}	20.23±7.12^{cde}
	5 月	K1	442.26±6.14^{c}	31.17±0.61^{def}	160.76±6.76^{bc}	225.66±7.41^{b}	24.67±0.91^{abc}
		K0	386.13±16.50^{fg}	27.79±1.72^{fg}	140.53±8.88^{cdef}	195.24±10.34^{c}	22.57±0.42^{abcd}
	11 月	K1	487.34±9.71^{b}	31.23±0.71^{def}	185.98±24.37^{a}	242.26±25.16^{b}	27.86±2.54^{a}
		K0	393.79±21.35^{efg}	26.13±2.14^{g}	150.16±3.75^{cde}	193.31±26.38^{c}	24.19±1.65^{abc}
赣无 2/赣无 2 GW2/GW2	3 月	–	330.40±13.04^{h}	20.66±2.65^{h}	93.87±7.63^{g}	199.91±7.96^{c}	15.97±1.42^{e}
	5 月	K1	414.57±6.87^{d}	28.75±0.96^{fg}	132.33±5.18^{def}	231.25±6.19^{b}	22.25±0.54^{bcd}
		K0	419.77±10.23^{d}	31.10±0.78^{def}	142.63±8.74^{cdef}	227.87±1.32^{b}	18.17±0.61^{de}
	11 月	K1	470.68±4.46^{b}	34.69±2.89^{bcd}	161.48±20.64^{bc}	247.61±14.16^{b}	26.90±2.16^{ab}
		K0	479.35±8.62^{b}	39.13±2.82^{a}	180.71±20.37^{ab}	240.36±15.47^{b}	19.14±2.53^{cde}

不同小写字母表示各嫁接组合及钾水平处理在5%水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences among months and treatments at the 5% level.

2.1.2　茎解剖结构

同砧不同穗油茶苗茎解剖结构统计结果(表3)表明,不同穗条组合油茶苗茎直径和髓直径对缺钾的响应存在明显差异,赣 8 穗条组合表现为前期不利后期促进,11 月份时的茎直径和髓直径明显大于 K1

表 3　同砧不同穗油茶苗茎解剖结构

Tab.3　Anatomy of *Camellia oleifera* stems with the same rootstock and different scions

砧穗组合 Scion/rootstock	月份 Month	钾处理 Treatment	茎直径/μm Stem diameter	髓直径/μm Pulp diameter	木质部厚度/μm Xylem thickness	韧皮部厚度/μm Phloem thickness
赣 8/赣无 2 G8/GW2	3 月	–	1 164.06±71.67^{h}	660.34±90.54^{gh}	119.31±35.34^{g}	65.24±7.95^{f}
	5 月	K1	1 939.56±64.91^{d}	1 101.85±101.15^{bc}	197.84±22.75^{f}	108.53±2.94^{bcd}
		K0	1 678.28±79.48^{e}	770.38±18.27^{ef}	258.12±11.61^{def}	97.45±0.68^{bcde}
	11 月	K1	2 287.58±60.57^{c}	791.65±31.76^{ef}	383.41±20.57^{b}	125.65±20.90^{ab}
		K0	2 545.82±61.12^{a}	1 169.28±59.38^{b}	391.35±16.35^{b}	148.00±12.72^{a}
赣无 1/赣无 2 GW1/GW2	3 月	–	1 365.75±31.39^{g}	559.46±25.91^{h}	220.65±15.94^{ef}	103.75±5.79^{bcde}
	5 月	K1	1 878.23±64.41^{d}	823.77±22.48^{e}	291.78±21.65^{d}	118.66±11.56^{bc}
		K0	1 441.54±108.55^{g}	631.80±37.30^{gh}	222.85±31.77^{ef}	90.62±16.87^{cdef}
	11 月	K1	2 432.76±82.85^{b}	981.45±11.42^{d}	492.00±47.59^{a}	112.72±6.36^{bcd}
		K0	1 919.37±30.30^{d}	697.32±50.14^{fg}	379.41±29.29^{bc}	116.20±7.76^{bcd}
赣无 2/赣无 2 GW2/GW2	3 月	–	1 481.82±36.26^{fg}	789.04±10.50^{ef}	97.14±15.56^{g}	88.97±14.18^{def}
	5 月	K1	1 885.98±65.67^{d}	1 038.98±104.48^{cd}	284.67±11.85^{de}	105.14±14.24^{bcde}
		K0	1 573.36±44.93^{ef}	565.18±68.00^{h}	329.16±12.86^{bcd}	77.04±9.62^{ef}
	11 月	K1	2 379.99±54.97^{bc}	1 308.86±41.35^{a}	300.81±106.10^{d}	113.17±39.51^{bcd}
		K0	1 985.11±88.52^{d}	944.93±61.52^{d}	314.21±48.83^{cd}	101.25±8.40^{bcde}

不同小写字母表示各嫁接组合及钾水平处理在5%水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences among months and treatments at the 5% level.

处理，分别大 11.29% 和 47.70%；赣无 1 穗条组合则一直受缺钾胁迫，5 月份和 11 月份的茎直径、髓直径和木质部厚度均为 K0 处理明显小于 K1 处理，11 月份时分别小 21.33%、28.95% 和 22.87%；赣无 2 穗条组合的茎直径和髓直径也是 K0 处理明显更小，11 月份时较 K1 分别小 16.60% 和 27.81%；各嫁接组合的韧皮部厚度对缺钾的响应均不明显。

由表 4 可知，缺钾处理对 3 种同穗不同砧组合的茎解剖结构产生的影响大体一致。茎直径除赣无 1 砧木组合在 5 月份与 K1 处理差别不大外，赣 8 砧木组合和赣无 2 砧木组合均受到显著抑制，K0 处理较 K1 处理分别下降了 19.15% 和 16.58%；到 11 月份时，3 个砧木组合的茎直径均是 K1 处理时更大。3 个砧木组合的髓直径均受到缺钾抑制，5 月份和 11 月份时均是 K1 处理明显大于 K0 处理。11 月份时，赣 8、赣无 1 和赣无 2 3 个砧木组合的茎直径在 K0 处理下较 K1 处理分别下降了 9.98%、11.68% 和 16.60%，髓直径分别下降了 21.10%、30.22% 和 27.81%。缺钾处理对 3 个砧木组合的木质部和韧皮部厚度影响均未达到显著水平。结果表明，油茶苗茎的解剖结构对低钾处理的响应与穗条品种的关系更密切。

表 4 同穗不同砧油茶苗茎解剖结构

Tab.4 Anatomy of *Camellia oleifera* stems with the same scions and different rootstock

砧穗组合 Scion/rootstock	月份 Month	钾处理 Treatment	茎直径/μm Stem diameter	髓直径/μm Pulp diameter	木质部厚度/μm Xylem thickness	韧皮部厚度/μm Phloem thickness
赣无 2/赣 8 GW2/G8	3 月	–	1 651.2±17.36^{ef}	723.2±22.65^{fg}	197.1±40.46^{f}	125.3±30.87^{a}
	5 月	K1	1 845.1±76.06^{cd}	813.1±103.21^{def}	272.7±17.22^{def}	95.3±8.63^{bc}
		K0	1 491.7±111.80^{gh}	651.6±87.51^{gh}	221.1±31.80^{ef}	76.4±8.20^{c}
	11 月	K1	2 165.5±78.34^{a}	928.6±67.29^{bc}	392.0±79.29^{bc}	103.4±20.31^{abc}
		K0	1 949.3±121.36^{bc}	733.0±11.82^{fg}	396.7±37.04^{bc}	105.6±15.09^{abc}
赣无 2/赣无 1 GW2/GW1	3 月	–	1 404.7±18.55^{h}	820.6±25.60^{cd}	99.4±3.31^{g}	72.6±20.04^{c}
	5 月	K1	1 753.1±69.62^{de}	865.4±90.93^{cd}	389.2±101.95^{bc}	112.4±5.50^{ab}
		K0	1 761.8±29.98^{de}	814.1±76.30^{de}	307.3±48.89^{cde}	90.5±18.30^{abc}
	11 月	K1	2 208.7±21.28^{a}	828.8±18.98^{cd}	497.0±20.17^{a}	101.3±13.17^{abc}
		K0	1 951.3±17.72^{bc}	578.5±54.57^{h}	482.1±68.92^{ab}	99.4±7.01^{bc}
赣无 2/赣无 2 GW2/GW2	3 月	–	1 481.82±36.26^{ef}	789.04±10.50^{ef}	97.14±15.56^{g}	88.97±14.18^{bcd}
	5 月	K1	1 885.98±65.67^{c}	1 038.98±104.48^{b}	284.67±11.85^{de}	105.14±14.24^{ab}
		K0	1 573.36±44.93^{d}	565.18±68.00^{h}	329.16±12.86^{bcd}	77.04±9.62^{c}
	11 月	K1	2 379.99±54.97^{ab}	1 308.86±41.35^{a}	300.81±106.10^{d}	113.17±39.51^{ab}
		K0	1 985.11±88.52^{c}	944.93±61.52^{bc}	314.21±48.83^{cd}	101.25±8.40^{abc}

不同小写字母表示各嫁接组合及钾水平处理在 5% 水平差异显著。

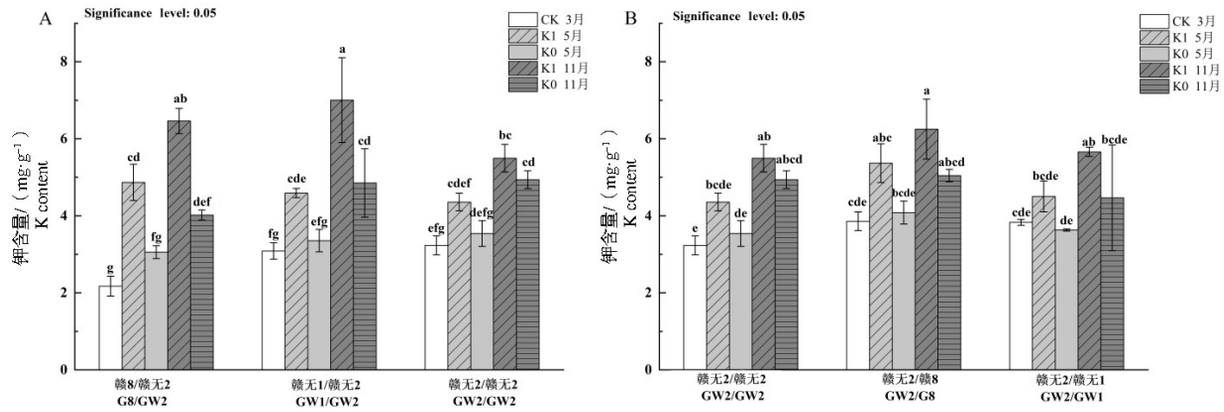
Different lowercase letters indicate significant differences among months and treatments at the 5% level.

2.2 砧穗对缺钾胁迫油茶苗茎叶钾养分含量的影响

2.2.1 叶钾养分含量

由图 3 可知，不同砧穗组合油茶苗叶片钾含量的分析显示，油茶苗叶片钾含量对钾素处理的响应存在显著差异。在同砧不同穗组合中，3 月份叶钾含量无显著差异。5 月时，缺钾处理使赣 8 穗条组合叶钾含量显著降低，赣无 1、赣无 2 穗条组合也表现为抑制，但无显著差异；到 11 月时，缺钾条件下赣 8、赣无 1 穗条组合叶钾含量较 K1 处理显著下降，而赣无 2 穗条组合叶钾含量未受显著影响，展现出缺钾耐受性；施钾条件下赣无 1 穗条组合叶钾含量较赣 8、赣无 2 穗条组合分别显著高出 8.42% 和 27.48%，而不施钾条件下，3 个同砧不同穗组合的叶钾含量差异不明显。

在同穗不同砧组合中，砧木品种对叶钾含量影响不明显，无论钾处理前的 3 月份还是钾处理后的 5 月、10 月份，3 个组合叶钾含量均无显著差异，缺钾处理虽整体抑制叶钾含量，但差异没有达到显著水平。说明油茶嫁接苗叶片钾含量对钾水平的响应差异主要受穗条品种影响，与砧木品种关系不大。



不同小写字母表示各嫁接组合及钾水平处理在5%水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences among months and treatments at the 5% level.

图3　油茶叶钾养分含量

Fig.3　Potassium nutrient content of *Camellia oleifera*

2.2.2　茎钾养分含量

不同砧穗组合油茶苗茎钾养分含量的分析(图4)显示,油茶苗茎钾含量对钾素处理的响应存在差异。同砧不同穗组合中,3月份的茎钾养分含量无显著差异;5月份时缺钾使赣无1穗条组合茎钾含量较施钾处理显著降低40.7%,而赣8、赣无2穗条组合受缺钾处理的影响不明显,无论是否缺钾,两者的茎钾养分含量均无显著差异。

3月和11月同穗不同砧组合在缺钾条件下均没有显著性差异。5月赣无1砧木组合茎钾养分含量在缺钾条件下显著抑制36.9%。赣无1品种无论做砧木还是穗条在5月对缺钾的响应都很敏感,赣8和赣无2品种对缺钾的响应均不显著。综上所述,油茶茎中钾含量与穗条和砧木均有关。

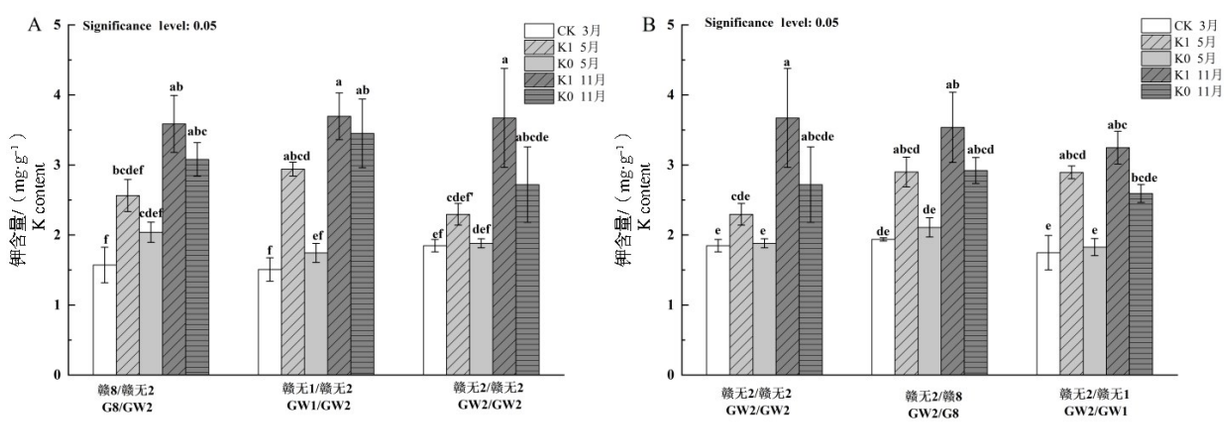


图4　油茶茎钾养分含量

Fig.4　Potassium nutrient content of *Camellia oleifera* stems

2.3　砧穗对缺钾胁迫油茶苗水势的影响

由表5和表6可知,不同砧穗组合油茶苗水势对缺钾处理的响应存在差异。在同砧不同穗组合中,缺钾处理整体使油茶水势升高,其中对赣8穗条组合的影响最显著,其5月份和11月份时的清晨水势较施钾处理分别升高了67.86%和45.82%;赣无1穗条组合对缺钾处理的响应不明显,赣无2穗条组合则是到11月份才表现出明显下降;所有组合的正午水势均明显更低,但缺钾处理对赣8、赣无1穗条组合的影响均不明显,赣无2本砧也是到11月份才表现出明显的负面影响,较施钾处理上升了30.48%。

同穗不同砧组合中,也是清晨水势对缺钾处理响应更敏感。缺钾处理使赣8砧木组合的清晨水势在5月显著上升到该时期最高,为0.77,而到11月份差别不明显;缺钾处理也使赣无2、赣无1砧木组合的清晨水势对缺钾的响应更慢,5月份与K1处理差别不显著,到11月份才明显上升。正午水势上,缺钾处理对赣无8、赣无1砧木组合的影响不显著,对赣无2砧木组合的影响也是到11月份才达到显著水平。

表5 同砧不同穗油茶苗水势

Tab.5 Water potential of *Camellia oleifera* seedlings with the same rootstock and different scions

品种 Variety	月份 Month	钾处理 K treatment	清晨水势 Early morning water potential	正午水势 Midday water potential
赣8/赣无2 G8/GW2	3月	–	−1.60±0.98^{abc}	−7.37±2.41^{a}
	5月	K1	−2.80±1.41^{c}	−7.77±1.25^{a}
		K0	−0.90±0.53^{ab}	−6.23±1.44^{a}
	11月	K1	−4.67±1.58^{d}	−6.47±0.35^{a}
		K0	−2.53±1.69^{bc}	−6.03±2.06^{a}
赣无1/赣无2 GW1/GW2	3月	–	−0.83±0.25^{a}	−5.93±1.69^{a}
	5月	K1	−1.17±0.49^{abc}	−8.40±2.65^{a}
		K0	−1.17±0.75^{abc}	−9.00±2.69^{ab}
	11月	K1	−2.13±0.25^{bc}	−9.40±1.22^{ab}
		K0	−0.93±0.29^{ab}	−8.67±0.4^{ab}
赣无2/赣无2 GW2/GW2	3月	–	−1.03±0.42^{ab}	−5.70±1.8^{a}
	5月	K1	−1.27±0.35^{abc}	−9.27±3.06^{ab}
		K0	−1.00±0.8^{ab}	−6.80±2.01^{a}
	11月	K1	−4.33±0.6^{d}	−12.27±2.37^{b}
		K0	−2.10±0.35^{bc}	−8.53±1.89^{a}

不同小写字母表示各嫁接组合及钾水平处理在5%水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences among months and treatments at the 5% level.

表6 同穗不同砧油茶苗水势

Tab.6 Water potential of *Camellia oleifera* seedlings with the same scion and different rootstocks

品种 Variety	月份 Month	钾处理 K treatment	清晨水势 Early morning water potential	正午水势 Midday water potential
赣无2/赣8 GW2/G8	3月	–	−1.50±1.25^{ab}	−6.60±1.41^{ab}
	5月	K1	−2.73±1.5^{bc}	−8.63±1.24^{abc}
		K0	−0.77±0.21^{a}	−10.60±2.31^{cd}
	11月	K1	−2.70±1.04^{bc}	−8.30±0.2^{abc}
		K0	−2.90±0.44^{c}	−9.70±0.36^{bcd}
赣无2/赣无1 GW2/GW1	3月	–	−1.10±0.3^{a}	−6.27±2.66^{ab}
	5月	K1	−1.37±0.55^{a}	−8.00±1.84^{abc}
		K0	−0.90±0.17^{a}	−6.67±2.27^{ab}
	11月	K1	−6.77±0.57^{e}	−9.23±1.27^{abcd}
		K0	−1.97±0.32^{abc}	−8.57±1.99^{abc}
赣无2/赣无2 GW2/GW2	3月	–	−1.03±0.42^{ab}	−5.70±1.8^{a}
	5月	K1	−1.27±0.35^{abc}	−9.27±3.06^{ab}
		K0	−1.00±0.8^{ab}	−6.80±2.01^{a}
	11月	K1	−4.33±0.6^{d}	−12.27±2.37^{d}
		K0	−2.10±0.35^{abc}	−8.53±1.89^{a}

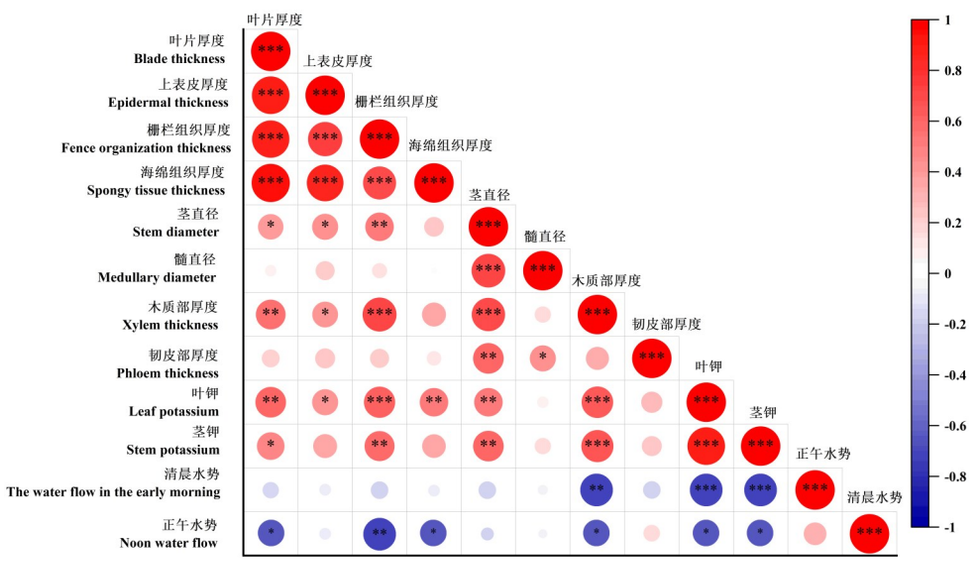
不同小写字母表示各嫁接组合及钾水平处理在5%水平差异显著。

Different lowercase letters indicate significant differences among months and treatments at the 5% level.

2.4 解剖学特征与水养特征相关性分析

对芽苗砧嫁接油茶苗期解剖学特征、钾含量(叶钾、茎钾)与水分生理的相关性分析结果(图5)显示,三者间存在显著相关性。解剖学特征间及解剖学特征与钾含量多呈正相关,解剖学特征、钾含量与水势多呈负相关;其中,所有解剖学特征指标与钾含量指标均为正相关;叶片解剖结构内部各指标间均呈极显著正相关;茎直径与叶片厚度、叶上表皮厚度呈显著正相关,且与栅栏组织厚度呈极显著正相关;髓直

径与茎直径呈极显著正相关;木质部厚度与叶片厚度、叶上表皮厚度、茎直径均呈极显著正相关。可见叶片厚度与叶片各组织厚度、茎直径及髓直径均呈正相关关系。叶钾含量与叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、茎直径、木质部厚度呈极显著正相关;茎钾含量与栅栏组织厚度、茎直径、木质部厚度、叶钾含量呈极显著正相关。由此可推断,叶片、茎的解剖结构参数受低钾处理影响时会同步下降,体现钾素对解剖结构发育的支撑作用。在解剖学特征、钾含量与水势的相关性上,叶片解剖参数与清晨水势无显著相关性,但茎解剖参数中的木质部厚度与清晨水势呈极显著负相关;正午水势与叶片厚度、海绵组织厚度、木质部厚度呈显著负相关,与栅栏组织厚度呈极显著负相关;同时,清晨水势与叶钾、茎钾含量均呈极显著负相关,正午水势与叶钾、茎钾含量均呈显著负相关,结合这一负相关关系可推断,低钾处理会使叶、茎钾含量下降,进而使清晨水势与正午水势显著升高。



***表示差异 0.1% 水平显著,**表示差异 1% 水平显著,*表示差异 5% 水平显著。

*** indicates that the difference is 0.1% significant,** indicates the significance of the difference of 1%, and * indicates the significance of the difference of 5%.

图 5　油茶苗解剖学特征及钾含量与水分生理的相关性分析

Fig.5　Analysis of anatomical characteristics of *Camellia oleifera* seedlings and correlation between potassium content and water physiology

3　讨　论

3.1　油茶嫁接苗解剖结构的砧穗效应

油茶是中国重要的木本油料树种,其繁殖主要依赖于嫁接技术,而砧木和接穗均会影响油茶幼苗对养分的吸收、生长以及对逆境的响应[10-12]。本研究证实,在缺钾胁迫一个生长周期后,同砧不同穗的组合或同穗不同砧的组合间,其叶片和茎的解剖结构参数对缺钾胁迫的响应均表现出显著差异。赣无 2 本砧表现为栅栏组织增厚,下表皮变薄,茎直径和髓直径变小,其他结构变化不明显。赣无 1 无论做砧木还是做接穗,除叶的下表皮和茎的韧皮部外,缺钾胁迫使其叶片上表皮、栅栏组织、海绵组织等及总厚度明显变薄,茎直径和髓直径变小,木质部变细。而赣 8 则相反,缺钾处理的这些组织明显更厚。赣 8 的这种响应可能是一种补偿性生长,即在面临某种限制(如接穗自身遗传特性或特定环境压力)时,植物通过增加叶片组织厚度来增强保护作用或减少水分散失[13]。这与嫁接可以改变植物应对环境胁迫的生理和形态特征的普遍认知相符[11,14-15]。髓直径的大小通常与植物的导水能力和整体长势相关。赣 8 在缺钾条件下髓直径变大,可能说明其在缺钾逆境下能更好地维持维管组织的完整性和功能,从而支持接穗的生长和水分运输。这体现了砧木在增强植物对非生物胁迫(如营养缺乏)适应性方面的关键作用[11,16-17]。

3.2 油茶嫁接苗钾养分含量的砧穗效应

钾是植物生长发育必需的常量营养元素，参与多种生理生化过程，包括酶的活化、渗透调节和光合作用等[18-19]。本研究中，缺钾胁迫影响油茶叶片对钾养分的积累，同砧不同穗油茶苗其敏感性更多与接穗品种有关，即不同接穗品种对钾缺乏的反应强度会有差异。同穗不同砧油茶苗，尽管叶片生长受缺钾处理抑制，但叶钾养分含量本身并未产生显著差异[20]。这可能说明在缺钾条件下，植物会优先将有限的钾分配到关键部位，或者通过其他生理机制来维持叶片的最低钾水平，以避免更严重的生理功能障碍[21]。油茶茎钾含量对于缺钾胁迫所做出的响应，受到穗条以及砧木基因型的共同作用，5月份，“赣无1”穗条组合的茎钾含量出现明显下降，而接穗为“赣8”和“赣无2”的组合则未受到明显影响，这说明不同穗条基因型在钾吸收、运输或者利用效率方面存在固有的差异。在5月份，当“赣无1”作为砧木时，缺钾处理使得其所在组合的茎钾含量降低了36.9%，这充分证明了砧木自身生理特性的影响。这可能与其根系的发育状况、对土壤钾的吸收能力以及向地上部运输钾的效率有关。“赣无1”作为砧木时对缺钾的敏感性，或许源于其根系构型较差或钾转运蛋白活性较低，导致在钾胁迫下无法为地上部提供充足的钾供应[22]。本研究还发现，缺钾对茎钾含量的影响并非在整个生长周期内均匀体现，而是具有十分突出的时期特异性。这很有可能是因为5月份是油茶的旺盛生长阶段，新陈代谢较为活跃，对钾等营养元素的需求达到了高峰。在这个生理需求的高峰期，一旦钾素供应不足，其负面影响就会集中显现出来。

3.3 油茶嫁接苗水势的砧穗效应

水势是衡量植物水分状况的重要生理指标[13]。在同砧木组合里，“赣8”穗条对缺钾表现出最为敏感的特性，其清晨水势在5月和11月均出现升高。这种升高可能是由于“赣8”穗条品种自身的气孔调节能力比较弱，或渗透调节物质的合成量不足，导致缺钾条件下水分流失加剧，从而使水势升高。而“赣无1”和“赣无2”穗条具有更强的渗透调节能力或气孔控制能力[24-25]，响应不明显或出现延迟。在同穗条组合中，“赣8”砧木组合的响应速度很快，这可能源于其钾吸收转运系统对缺钾极为敏感，致使早期水分吸收能力受到严重限制。“赣无1”和“赣无2”砧木组合的响应较为迟缓，其根系可更有效地从土壤中获取水分，从而延缓胁迫效应，所有组合的正午水势本身更低，对缺钾的响应并不显著，这是因为正午水势主要受高温强光下蒸腾作用的驱动，环境因素占据主导地位，掩盖了缺钾的专一性影响。而清晨水势经过一夜的水分补充，更可真实地反映根系吸水功能及水分运输系统的完整性，对缺钾造成的系统性损伤指示更早且更准确[26-27]。在本研究中，砧木是决定油茶嫁接苗水分胁迫响应强弱及响应早晚的更为关键的因素，这意味着砧木的遗传特性决定了幼苗在缺钾条件下如何调节其水分状况，进而影响其整体生理适应性[28]。

4 结 论

本研究通过芽苗砧嫁接油茶盆栽试验，探究了油茶幼苗在缺钾胁迫下的形态解剖特征与水养生理响应机制。结果表明，油茶对缺钾的响应存在显著砧穗效应：叶片解剖结构和茎钾含量对缺钾的响应由穗条和砧木共同主导，叶片钾含量、茎解剖结构及水分生理（水势）主要受穗条基因型主导。在低钾条件下，叶和茎结构参数与钾含量一起协同下降，凸显了钾在组织发育中的支持功能。在生产实践中，穗条与砧木的选择均对植株的生长状态起决定作用。在选定适地的砧木穗条良种后，水肥的精准管理依然是树体生长优劣的重要决定因素。

参考文献 References：

[1] 廖婷，袁德义，袁军，等.4个油茶优良无性系花器特征及花粉萌发率[J].中南林业科技大学学报，2010，30(9)：51-54.
Liao T，Yuan D Y，Yuan J，et al.Flower characteristics and pollen germination rate of four *Camellia oleifera* clones[J].Journal of Central South University of Forestry and Technology，2010，30(9)：51-54.

[2] 王振丽，廖惠宇，胡冬南，等.砧、穗品种对油茶芽苗砧嫁接体形态的影响[J].江西农业大学学报，2021，43(1)：126-135.

Wang Z L, Liao H Y, Hu D N, et al.Effects of stock and scion varieties on the morphology of grafted seedlings of *Camellia oleifera* Abel.[J].Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 126-135.

[3] 龙伟, 姚小华, 王开良, 等. 普通油茶砧穗嫁接组合的亲和性分析[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(2): 346-351.
Long W, Yao X H, Wang K L, et al.The analysis of the affinity of rootstock and scion in the grafting seedlings of *Camellia oleifera*[J].Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(2): 346-351.

[4] 任可为, 刘娟, 邹中华, 等. 不同砧木对5年生芽苗砧嫁接油茶叶片解剖结构及其生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(4): 98-107.
Ren K W, Liu J, Zou Z H, et al.Effects of rootstocks on anatomical structure and physiological characteristics of 5-year-old *Camellia oleifera* leaves grafted on bud seedlings[J].Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2025, 45(4): 98-107.

[5] Zhang J, Lu Z, Pan Y, et al.Potassium deficiency aggravates yield loss in rice by restricting the translocation of non-structural carbohydrates under *Sarocladium oryzae* infection condition [J].Physiol Plant, 2019, 167(3): 352-364.

[6] Sun T T, Zhang J K, Zhang Q, et al.Transcriptional and metabolic responses of apple to different potassium environments [J].Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1131708.

[7] 胡冬南, 刘亮英, 张文元, 等. 江西油茶林地土壤养分限制因子分析[J]. 经济林研究, 2013, 31(1): 1-6.
Hu D N, Liu L Y, Zhang W Y, et al.Analysis on limiting factors of soil nutrient of *Camellia oleifera* forest in Jiangxi[J].Economic Forest Research, 2013, 31(1): 1-6.

[8] 张文元, 牛德奎, 郭晓敏, 等. 施钾水平对油茶养分积累和产油量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 863-868.
Zhang W Y, Niu D K, Guo X M, et al.Effect of different levels of potassium fertilization on nutrient accumulation and oil yield of *Camellia oleifera* Abel.[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 863-868.

[9] 游璐. 不同油茶品种生长生理及根系转录组对缺钾胁迫的响应[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020: 17.
You L.Responses of growth, physiological characteristics of different cultivars and root transcriptome to potassium deficiency stress in *Camellia oleifera* Abel.[D].Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020: 17.

[10] Ge X N, Zhong Q P, Tan X J, et al.Integrated multi-omics analysis to elucidate the role of shikimic acid and phenethylamine in the effect of scions on rootstocks of *Camellia oleifera*[J].Industrial Crops and Products, 2023, 203: 117222.

[11] Nie W J, Wen D.Study on the applications and regulatory mechanisms of grafting on vegetables[J].Plants, 2023, 12(15): 2822.

[12] Feng J L, Yang Z J, Chen S P, et al.Signaling pathway in development of *Camellia oleifera* nurse seedling grafting union[J].Trees, 2017, 31(5): 1543-1558.

[13] Tobar S, Gil P M, Schaffer B, et al.Physiological and growth responses of W. Murcott tangor grafted on four rootstocks under water restriction[J].Horticulturae, 2024, 10(4): 352.

[14] Fernández-Paz J, Cortés A J, Hernández-Varela C A, et al.Rootstock-mediated genetic variance in cadmium uptake by juvenile cacao(*Theobroma cacao* L.)genotypes, and its effect on growth and physiology[J].Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 777842.

[15] Luo L D, Zheng Y, Gao Z, et al.Grafting improves drought stress memory by increasing the *P5CS1* gene expression in *Brassica rapa*[J].Plant and Soil, 2020, 452: 61-72.

[16] Zhang J, Wang P C, Tao Z, et al.Phosphate-solubilizing bacteria abate cadmium absorption and restore the rhizospheric bacterial community composition of grafted watermelon plants[J].Journal of Hazardous Materials, 2022, 438: 129563.

[17] Martínez J P, Fuentes R, Badilla D, et al.Improving the salt tolerance of "Old Limachino Tomato" by using a new salt-tolerant rootstock[J].Horticulturae, 2024, 10(8): 780.

[18] Vengavasi K, Elumalai K, Srinivasavedantham V, et al.Deficiency, critical threshold, and sufficiency levels for hydroponic supplementation of major nutrients for evaluating sugarcane under controlled conditions[J].Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(1): 1002-1014.

[19] Ramirez Soler C H, Helera C, Magnitskiy S, et al.Photosynthesis, biochemical activity, and leaf anatomy of tree tomato(*Solanum betaceum* Cav.)plants under potassium deficiency[J].Journal of Applied Botany and Food Quality, 2021, 94, 75.

[20] Daoud B, Pawelzik E, Naumann M. Different potassium fertilization levels influence water-use efficiency, yield, and fruit quality attributes of cocktail tomato: a comparative study of deficient-to-excessive supply[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 272: 109562.

[21] Wang Y R, Wang Y, Li B, et al. The cotton high-affinity K^+ transporter, GhHAK5a, is essential for shoot regulation of K^+ uptake in root under potassium deficiency[J]. Plant and Cell Physiology, 2019, 60(4): 888-899.

[22] Vasilachi I C, Stoleru V, Gavrilescu M. Analysis of heavy metal impacts on cereal crop growth and development in contaminated soils[J]. Agriculture, 2023; 13(10): 1983.

[23] Hasan F U, Fatima B, Heaney-Mustafa S. A critique of successful elements of existing on-farm irrigation water management initiatives in Pakistan[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106598.

[24] He X S, Xu L C, Pan C, et al. Drought resistance of *Camellia oleifera* under drought stress: changes in physiology and growth characteristics[J]. PLoS One, 2020, 15(7): e0235795.

[25] Dong B, Wu B, Hong W H, et al. Transcriptome analysis of the tea oil camellia (*Camellia oleifera*) reveals candidate drought stress genes[J]. PLoS One, 2017, 12(7): e0181835.

[26] Kanai S, Moghaieb R E, El-Shemy H A, et al. Potassium deficiency affects water status and photosynthetic rate of the vegetative sink in green house tomato prior to its effects on source activity[J]. Plant Science, 2011, 180(2): 368-374.

[27] Yang C, Lu J W, Xiong Z H, et al. Potassium deficiency enhances imbalances in rice water relations under water deficit by decreasing leaf hydraulic conductance[J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176(3): 1-15.

[28] Labarga D, Mairata A, Puelles M, et al. The rootstock genotypes determine drought tolerance by regulating aquaporin expression at the transcript level and phytohormone balance[J]. Plants, 2023, 12(4): 718.

（责任编辑：刘玉香）



第一作者简介：曹市一，硕士生，研究方向为经济林栽培。在研究生期间学业优异，获得校奖学金。目前参与国家自然科学基金项目“根系分泌物对有机肥源 ARGs 在土壤-油茶体系迁移的阻控效应及机制”，为有机肥安全利用与油茶生态安全提供理论支撑。本人热衷于制作植物标本，注重将个人兴趣爱好与专业发展深度融合。



通信作者简介：胡冬南，江西农业大学二级教授，博士生导师。主要从事经济林栽培和育种方面的教学及相关科研工作。江西省高校中青年学科带头人，省百千万人才工程人选，江西省“最美林业科技推广员”、全国木本油料“一线工匠”。中国林学会经济林分会常务理事、中国中微量元素及肥料产学研创新联盟理事、中国植物营养与肥料学会施肥技术专业委员会委员、中国自然资源学会森林资源专业委员会委员、中国资源环境与生态保育学会理事、中国林学会林下经济分会委员、中国林业与环境促进会油茶产业分会理事和顾问、南方木本油料产业国家创新联盟副理事长、中国农技协袁州油茶科技小院负责人。主持承担国家自然科学基金、国家科技支撑计划专题、省教改课题等40多项，发表科研和教改论文190多篇，主编国家林草局“十三五”规划教材1部，出版专著3部；授权专利9项、软著3件，制定发布地方标准3项；研究成果获省部市级科技奖励20项、省级教学成果一等奖2项、二等奖1项；主讲课程被评定为省研究生优质课程1门、省本科一流课程2门；指导学生获得全国林业硕士专业学位优秀学位论文1篇、江西省优秀硕士学位论文1篇、中国植物营养与肥料学会优秀学位论文1篇，获省部级创新（实践）大赛一等奖2项、特等奖1项。