

剖面铝处理对橡胶树胶乳产量及生理参数的影响

王梦月^{1,2,3#}, 康 立⁴, 赵平娟³, 谢贵水², 刘 钊²,

张盈盈², 刘子凡^{1*}, 安 锋^{2*}

(1. 海南大学 热带农林学院, 海南 儋州 571737 中国; 2. 热带农业生态系统国家野外科学观测研究站/中国热带农业科学院 橡胶研究所, 海南 儋州 571737 中国; 3. 中国热带农业科学院 热带生物技术研究/热带作物生物育种国家重点实验室, 海南 海口 571101 中国; 4. 杨凌新世界组培有限公司, 陕西 杨凌 712100 中国)

摘要: 为明确铝胁迫对成龄橡胶树(*Hevea brasiliensis*)胶乳产量、生理参数和死皮病发生率的影响, 以开割8年的‘热研 7-33-97’橡胶树为材料, 利用2个不同pH的对照溶液(T0为超纯水, pH7.0; T1为用盐酸调节pH4.2的超纯水溶液)和4个浓度的AlCl₃溶液(T2~T5分别为50、100、200和400 mmol·L⁻¹的铝溶液, pH均为4.2)对剖面进行处理, 观察不同铝溶液处理早期、中期和后期橡胶树排胶体积、干胶产量、胶乳生理参数、死皮发生率和等级的变化。结果表明, 剖面铝处理早期的排胶体积和干胶产量增加, 中期下降到与对照持平水平, 后期低于对照, 但10刀的总排胶体积和干胶产量与对照无显著差异; 铝处理提高早中后3个时期胶乳的干胶含量、早期胶乳黄色体破裂指数和后期胶乳的硫醇含量, 说明铝处理导致排胶能力变差; 铝处理也导致早中后期胶乳蔗糖含量降低、后期胶乳镁离子浓度下降和无机磷浓度上升, 说明铝处理也导致了产胶性能变差; 另外, 高浓度铝处理也会导致死皮发生率和死皮等级的增加。试验结果显示, 高于50 mmol·L⁻¹的铝溶液处理剖面短期可以增加排胶体积, 维持一定时期内干胶产量的稳定, 但会导致排胶和产胶能力的下降, 诱导死皮病发生, 不利于维持长期胶乳产量的稳定。

关键词: 橡胶树; 铝胁迫; 剖面; 橡胶产量; 胶乳生理参数; 死皮发生率

中图分类号: S794.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2026)02-0165-10

王梦月, 康立, 赵平娟, 等. 剖面铝处理对橡胶树胶乳产量及生理参数的影响[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(2): 165–174. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240185 CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswwb.20240185



铝是地壳中含量最丰富的金属元素, 仅次于氧和硅^[1]。铝通常以无毒的铝硅酸盐矿物和氧化物等形态存在于土壤中, 对植物无毒害; 但在酸性条件下(pH<5.5), 铝会以交换态从土壤中释放出来, 对植物产生毒害^[2]。铝毒会破坏根尖结构、抑制根系伸长、影响根系吸收能力、导致植物地上部生长停止, 造成作物减产甚至整株死亡^[3-5]。据统计, 目前全球约有50%的潜在可耕种土地属于酸性土壤, 热带和亚热带地区土壤酸化导致的铝毒已成为制约作物生长和产量的重要因素^[6], 例如, 铝浓度增加会抑制水稻根系的伸长^[7]、降低小麦的产量^[8]和阻碍咖啡树根系的发育^[9]。尽管当前在

植物铝毒方面做了大量的研究工作, 但铝毒是否会影响橡胶树(*Hevea brasiliensis*)胶乳产量和死皮病发生率至今还没有报道。橡胶树是大戟科橡胶属多年生乔木, 其生产的天然橡胶广泛用于飞机、轮船及日常生活用品, 是重要的战略物资, 因此, 橡胶树具有重要的经济价值^[10]。橡胶树主要种植在热带和亚热带地区, 这些地区的土壤通常pH较低、交换性铝浓度高^[11], 因此橡胶树极容易受到铝的毒害。Nguyen等^[12]研究发现, 土壤中高浓度交换性铝可能是导致天然橡胶生产力低下的重要因素。本研究团队前期采用河沙^[13]和石英砂^[14]等盆栽试验研究了铝胁迫对橡胶苗生长的影响, 结果



收稿日期: 2024-12-17

修回日期: 2025-02-16

基金项目: 海南省自然科学基金项目(421RC753); 中国热带农业科学院基本科研业务费专项(1630022022014); 国家天然橡胶产业技术体系(CARS33-ZP1); 国家自然科学基金面上项目(31670633)

***第一作者:** 王梦月(2000—), 女, 海南大学热带农林学院2022级硕士研究生。E-mail: 2290112582@qq.com

***通信作者:** 刘子凡(1975—), 男, 教授。研究方向: 热带作物高效栽培。E-mail: jiangxilaobao@163.com

安锋(1977—), 男, 研究员。研究方向: 作物栽培与生理生态。E-mail: an-f@163.com

发现,铝对橡胶苗造成了不可逆的伤害,包括过氧化氢防御系统破坏、细胞膜透性大幅增加、叶绿素含量和光合速率下降、根系导水率下降和整株死亡。一般来说,通过外部排斥和内部解毒后,铝主要积累在根系的表皮和外皮,并由这些组织从根部运输到茎、叶中^[7-8]。在橡胶树中,随着铝浓度增加,地下与地上部铝含量均会增加,其中地下部比地上部累积更多,这说明随着铝胁迫的增加向上运输铝的速度增加^[13]。然而,向上运输的高浓度铝对橡胶树胶乳产量、潜在产胶能力及死皮病发生的影响目前尚未见报道。橡胶是多年生木本植物,需要种植7~8年后才能开始割胶,开割橡胶树根系施用铝溶液具有明显的破坏性。因此,本研究对橡胶树割面施用不同浓度的氯化铝溶液,模拟不同浓度铝胁迫,通过比较不同浓度铝处理对胶乳产量、排胶相关参数(如干胶含量、黄色体破裂指数和硫醇浓度)、产胶相关参数(如蔗糖含量、无机磷含量、镁离子含量和pH)及死皮病发生情况的影响,以阐明胶园土壤酸化导致的铝毒对橡胶树生长和产胶能力的影响,旨在为热区环境保护及天然橡胶生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料 试验在海南岛儋州市立地较为平缓的中国热带农业科学院试验场6队6903树位进行。该树位于2002年定植,2009年开割,橡胶树品种为‘热研7-33-97’。在该树位内选择生长状况较为均一、树围大小相对一致、树皮完好、无死皮症状、割面排胶正常的健康树30株作为试验材料,割制为半树围3 d1刀(1/2S 3 d)。

1.2 割面铝处理方法 根据割面所施的铝溶液不同,将试验橡胶树分为6组,其中T0为超纯水pH7.0, T1为超纯水pH4.2,均为对照; T2~T5分别为50、100、200和400 mmol·L⁻¹的氯化铝溶液, pH均为4.2; 每个处理含橡胶树5棵。试验开始前首先对小区内橡胶树连续割4刀,观测各区间排胶体积有无显著差异。随后,对橡胶树割线上下2 cm的树皮喷涂上述T0~T5溶液20 mL后,每3天割1刀,连续割10刀,分别收集胶乳数据。

1.3 排胶体积的测定方法 每刀割胶后收集全部排出胶乳,用量筒测量每株树的排胶体积。

1.4 干胶含量的测定方法 用电子天平称取5 g胶乳于培养皿中,加入少许体积分数为5%的冰醋酸进行凝固,凝固的胶片用水冲洗,放入80℃烘箱中烘至恒重(W1)、然后计算干胶含量(%)。

1.5 干胶产量的测定方法 通过干胶产量=胶乳质量×干胶含量计算每刀的干胶产量。

1.6 排胶和胶乳再生相关参数的测定方法 胶乳pH用pH计测量,硫醇含量用DTNB试剂法进行测定^[15],蔗糖含量采用蒽酮法测定^[16],无机磷含量采用钼酸铵比色法测定^[17],镁离子含量采用原子吸收分光光度计测定,黄色体破裂指数(BI)参考文献^[18]的方法进行测定。

1.7 死皮发生率的统计 死皮病发生率=(发病株数/调查株数)×100%。死皮分级参照文献^[19]的方法,即0级(正常树)、1级(死皮长度小于2 cm)、2级(死皮长度为2 cm至割线长度的1/4)、3级(死皮长度为割线长度的1/4至2/4)、4级(死皮长度为割线长度的2/4至3/4)、5级(死皮长度为割线长度的3/4以上),各级别代表值分别为0、1、2、3、4、5。

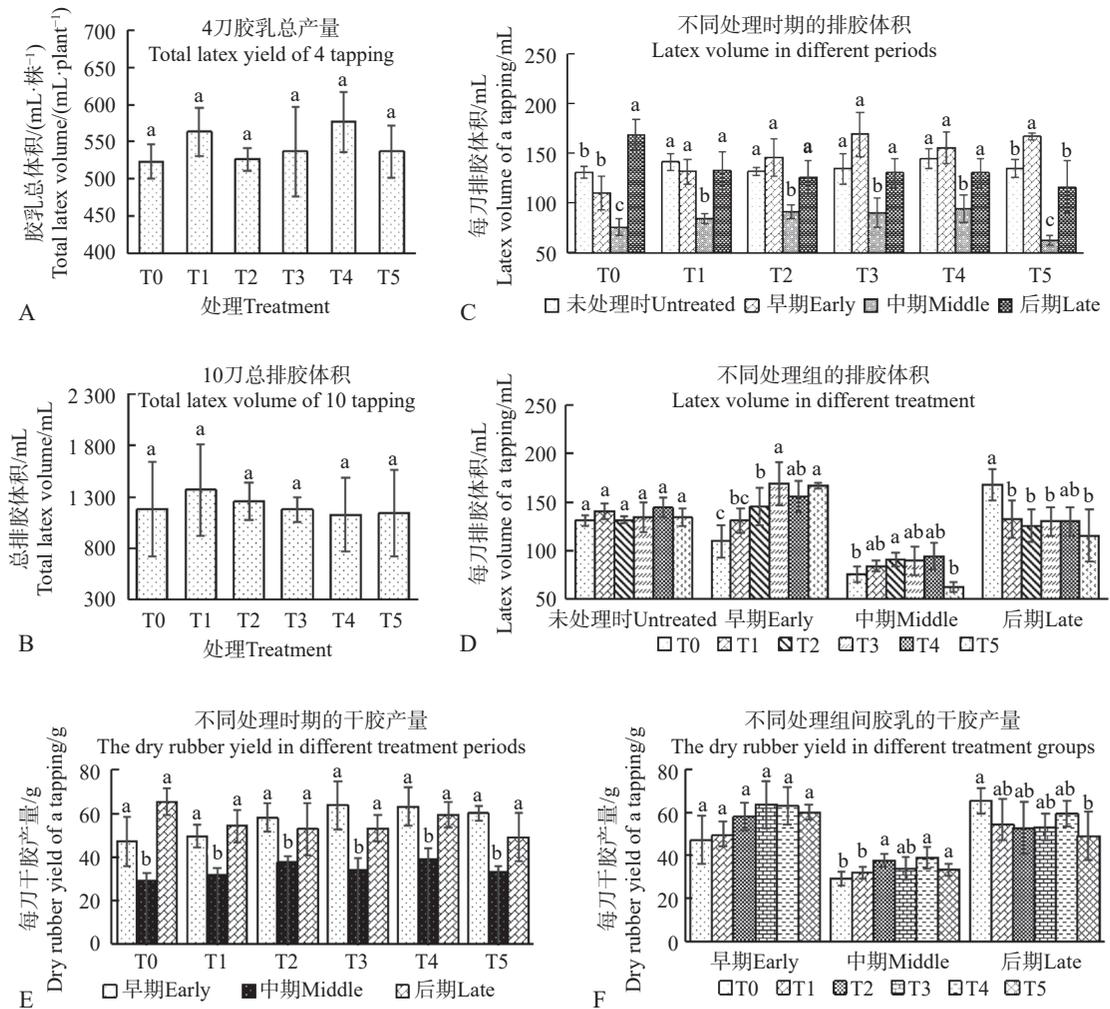
1.8 胶乳过氧化氢含量的测定 过氧化氢含量使用索莱宝公司过氧化氢酶检测试剂盒(Ct#BC0205)进行测定,具体方法参照说明书。

1.9 试验结果处理与统计分析 试验数据在Microsoft Excel 2010中整理和绘图,使用DPS软件的Tukey检验进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 割面不同铝浓度处理对胶乳产量和干胶产量的影响 本研究选的45株橡胶树中6株在割2刀后有死皮出现,9株排胶量极少,最终选择30株没有死皮和产量接近的作为研究材料,随机分为T0~T5共6组,并继续正常割2刀。对处理前4刀的排胶总体积进行比较(图1)可知,T0~T5各小组间橡胶树处理前4刀的胶乳总体积无显著差异(图1-A, $P<0.05$),说明所选橡胶树在正常生长条件下,不同组间的排胶能力基本相同。

为了研究不同铝浓度处理对排胶体积的长期影响,比较了处理后不同组10刀的总体积,结果显示,T0-T5组胶乳总体积间没有显著性差异(图1-B—C, $P<0.05$),说明铝处理不会影响30 d的总排胶体积。为研究铝胁迫后排胶量的变化趋势,将处理



A. 处理前 4 刀的总胶乳体积; B. 处理后 10 刀的总胶乳体积; C. 同一种处理不同处理时期每刀的胶乳体积的比较; D. 同一处理时期不同处理间的排胶体积的比较; E. 同一种处理不同处理时期的干胶产量比较; F. 同一处理时期不同处理间干胶产量的比较;

A. The total latex volume of 4 cuts before treatment; B. The total latex volume of 10 cuts after treatment; C. Comparison of latex volume per cut from the same treatment in different treatment periods; D. Comparison of latex volume between different treatments in the same treatment period. E. Comparison of dry rubber yield per cut from the same treatment in different treatment periods; F. Comparison of dry rubber yield between different treatments in the same treatment period.

图 1 铝处理对排胶体积和干胶产量的影响

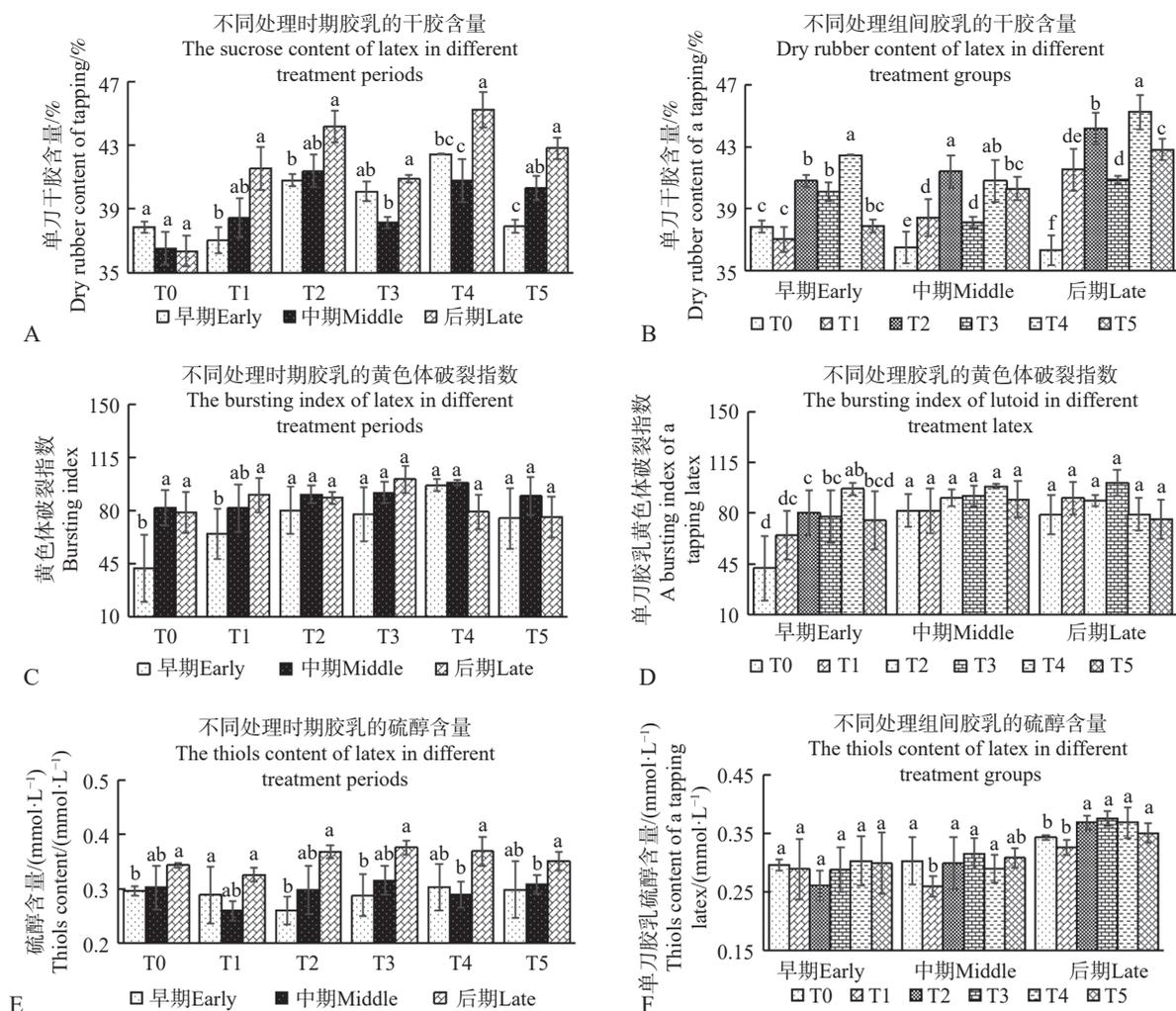
Fig. 1 Effect of aluminum treatment on latex volume and dry rubber yield

注: 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference at $P < 0.05$. Similarly hereinafter.

后 10 刀分为处理早期(处理后第 1~3 刀)、中期(处理后第 4~7 刀)和后期(处理后第 8~10 刀) 3 个阶段, 结果显示, 不同组的单刀排胶体积呈现早期较高, 中期下降, 后期升高的趋势(图 1-C, $P < 0.05$); 在处理早期和中期, 铝处理增加了单刀排胶体积, 且随铝处理浓度增加而增加($400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理中期除外); 处理后期, 单刀排胶体积显著低于对照(图 1-D)。同上, 总的干胶产量在不同铝浓度处理组之间无差异; 干胶产量早期和后期较高, 中期较低(图 1-E, $P < 0.05$), 处理早期不同组间无差异, 后期下降(图 1-F, $P < 0.05$)。

2.2 剖面不同浓度铝处理对排胶相关生理指标的影响 胶乳的干胶含量、BI 和硫醇含量与橡胶树的排胶能力密切相关。为研究铝胁迫通过什么方式影响橡胶树产量, 比较了处理后 3 个阶段干胶含量的变化及其同一阶段不同处理间干胶含量的差异(图 2), 结果显示, 对照组干胶含量早中后期没有显著变化, T1~T5 处理组后期干胶含量显著升高, 中期时不同组之间变化不一致(图 2-A, $P < 0.05$), 这说明铝处理对干胶含量有明显的影响。在早中后 3 个时期处理组的干胶含量显著高于对照组, 且有随着铝处理浓度增加而增加; 低



A. 处理后不同时期胶乳的干胶含量比较; B. 同一个处理时期不同处理间胶乳的干胶含量差异; C. 处理后不同时期胶乳的 BI 比较; D. 同一个处理时期不同处理间胶乳的 BI 差异; E. 处理后不同时期胶乳的硫醇浓度比较; F. 同一个处理时期不同处理间胶乳的硫醇浓度差异。

A. Comparison of dry rubber content per tapping from the same treatment in different treatment periods; B. Comparison of dry rubber content among different treatments in the same treatment period; C. Comparison of the luteoid bursting index (BI) per tapping from the same treatment in different treatment periods; D. Comparison of the luteoid bursting index among different treatments in the same treatment period; E. Comparison of the thiols content per tapping from the same treatment in different treatment periods; F. Comparison of the thiols content among different treatments in the same treatment period.

图 2 铝处理对排胶相关参数的影响

Fig. 2 Effect of aluminum treatment on relevant parameters to latex flow

pH 在处理中后期也提高了干胶含量, 但其没有铝处理影响的显著 (图 2-B, $P < 0.05$), 这说明铝处理提高了胶乳的干胶含量。

3 个阶段平均每刀胶乳 BI 及其同一阶段不同处理间胶乳 BI 的比较结果显示, T0 和 T1 组 BI 早期较低, 中期或者后期显著升高, T2 ~ T5 组 3 个时期 BI 无显著性差异, 说明 pH 的降低对胶乳 BI 无影响, 而铝处理导致早期 BI 增加或者中后期 BI 的降低 (图 2-C, $P < 0.05$), 不同处理组 BI 的比较显示, 处理早期 BI 显著升高 (图 2-D, $P < 0.05$), 说明低铝处理对胶乳 BI 有显著影响。硫醇浓度的

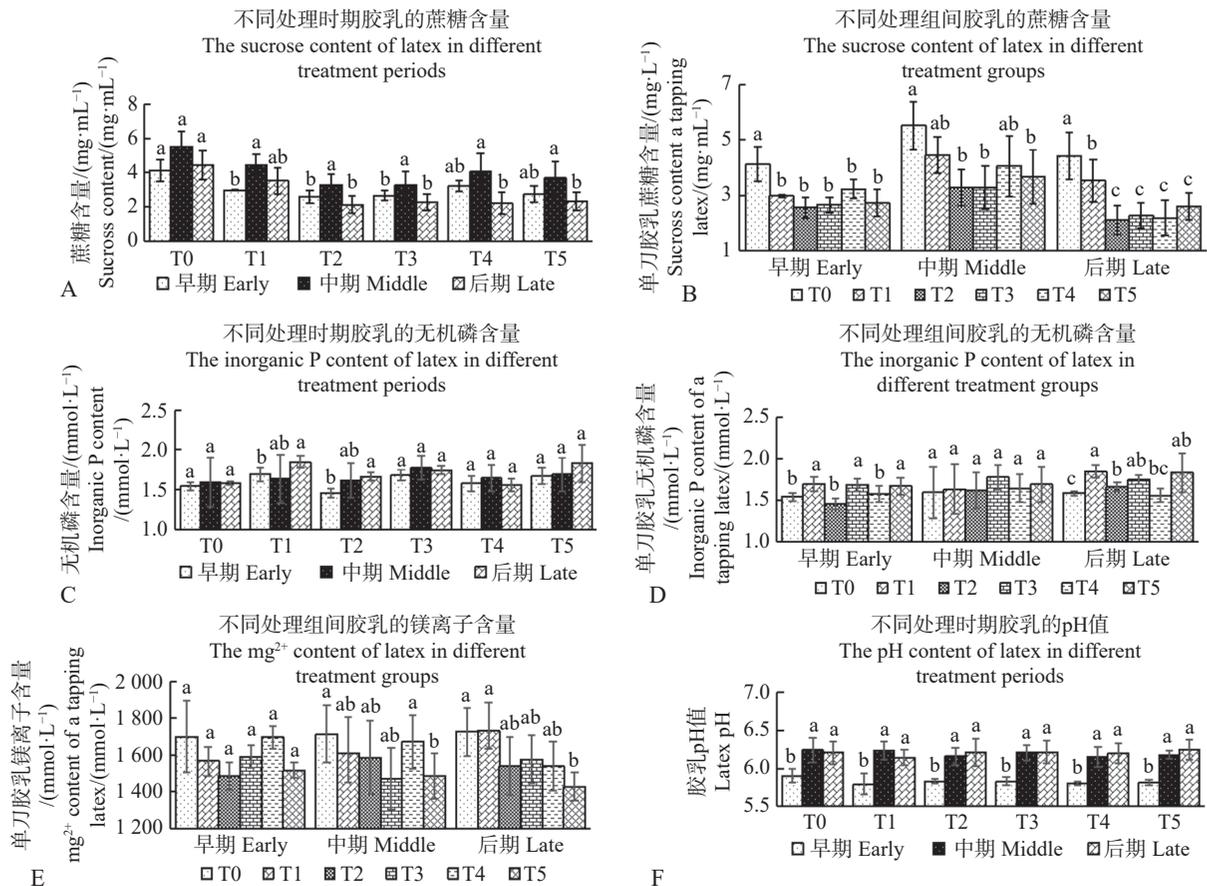
变化比较复杂, 对照中后期硫醇浓度增加, 处理组 T1 ~ T5 也是后期硫醇浓度最高, 但变化趋势有差异 (图 2-E, $P < 0.05$), 不同处理时期硫醇的比较显示处理早中期变化较小, 后期处理组 T2 ~ T5 的硫醇浓度显著升高 (图 2-F, $P < 0.05$), 说明 pH 降低对胶乳硫醇含量没有影响, 但铝处理提高了胶乳硫醇浓度。

综上所述, 铝胁迫大多会引起胶乳干胶含量增高、早期黄色体破裂指数增加和后期硫醇浓度增加, 导致处理后不同时间的胶乳排胶能力下降, pH 降低也对相关参数有一定影响, 但远没有铝处

理的影响显著。

2.3 剖面铝处理对胶乳再生相关参数的影响 胶乳无机磷含量、蔗糖含量、 Mg^{2+} 含量和 pH 是与胶乳合成密切相关的生理参数。为研究铝胁迫对橡胶树胶乳合成能力的影响,测定了剖面不同浓度铝处理胶乳中的蔗糖等含量的影响(图 3)。结果显示,处理组蔗糖含量在 3 个时期的变化趋势与对照相似,但 T1~T5 所有处理组都出现显著性差异,对照组无差异(图 3-A, $P<0.05$);所有处理组胶乳中的蔗糖含量在 3 个阶段均显著低于对照 T0,处理后 T1 组显著高于 T2~T5 组(图 3-B, $P<0.05$),说明铝处理会降低胶乳中蔗糖含量。不同处理组胶乳中的无机磷含量在 3 个阶段的变化趋势大多相似,无显著性差异,仅 T1 和 T2 后期显

著高于早期(图 3-C, $P<0.05$);处理组胶乳中的无机磷含量在早期和后期的 T1、T3 和 T5、后期的 T2 组均显著高于对照 T0,中期所有组间无显著性差异(图 3-D, $P<0.05$),说明较高铝处理导致胶乳无机磷含量增加,但这种增加可能也与 pH 降低有关。不同处理组胶乳中的镁离子含量在 3 个阶段的变化趋势相似,无显著性差异,但其含量在中后期的 T5 均显著低于对照 T0 和其他处理组,早期所有组间无显著性差异(图 3-E, $P<0.05$),说明高浓度铝处理导致胶乳镁离子含量降低,且这种影响和 pH 降低无关。剖面不同浓度铝处理胶乳的 pH 值在 2 个时期的变化趋势和对照完全相似,前期较低,中后期升高(图 3-F, $P<0.05$),但各处理的 3 个时期与对照比差异均不显著,说明剖面铝处理和



A. 处理后不同时期胶乳的蔗糖含量比较; B. 同一个处理时期不同处理间胶乳的蔗糖含量比较; C. 处理后不同时期胶乳中无机磷含量比较; D. 同一个处理时期不同处理间胶乳无机磷含量比较; E. 同一个处理时期不同处理间胶乳镁离子含量比较; F. 处理后不同时期胶乳的pH比较。

A. Comparison of sucrose content per tapping in different treatment periods of the same treatment; B. Comparison of sucrose content among different treatments in the same treatment period; C. Comparison of the inorganic phosphor content per tapping in different treatment periods of the same treatment; D. Comparison of the inorganic phosphorus among different treatments in the same treatment period; E. Comparison of Mg^{2+} content per tapping in different treatment periods of the Al concentration; F. Comparison of the thiols content among different treatments in the same treatment period.

图 3 铝处理对胶乳再生相关参数的影响

Fig. 3 Effect of aluminum treatment on relevant parameters to latex regeneration

pH降低对胶乳 pH 无显著影响。上述结果显示, pH 降低导致胶乳蔗糖含量降低, 但没有铝处理导致的蔗糖含量降低显著, 部分铝处理造成中后期胶乳镁离子浓度下降和后期胶乳无机磷浓度上升, 说明高浓度铝处理也导致了胶乳合成能力变差。

2.4 剖面铝处理对过氧化氢 (H_2O_2) 含量的影响 过氧化氢(H_2O_2)含量与橡胶树死皮病的发生

密切相关。T0 和 T1 组胶乳 H_2O_2 含量在 3 个阶段的变化趋势相似, 中期降低, 后期略有增加; T2 ~ T4 处理组较为相似, 中后期降低(图 4-A); 各处理组胶乳中的 H_2O_2 含量在早期均显著高于对照 T0 和 T1, 中后期所有组间仅有极少数有显著性差异(图 4-B), 说明低浓度的铝处理可能导致剖面的氧化胁迫伤害, 但这种伤害可以很快被修复。

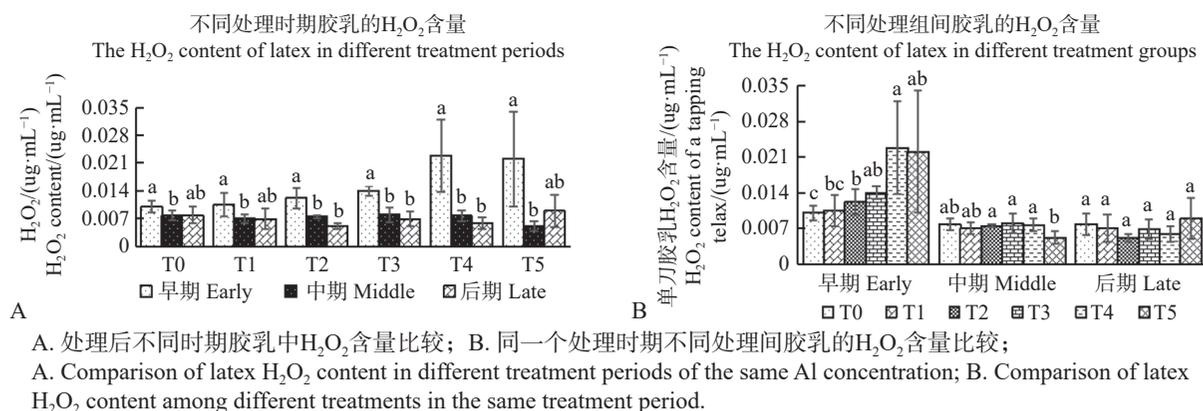


图 4 铝处理对胶乳 H_2O_2 含量的影响

Fig. 4 Effect of aluminum treatment the H_2O_2 content of latex

2.5 剖面铝处理对橡胶树死皮发生率和发生等级的影响 从表 1 和表 2 可以看出, T3、T4、T5 组剖面铝处理后在连续割 10 刀的过程中都出现了轻微的死皮症状, 死皮发生等级处于 1 ~ 3 级, 且都出现死皮症状消失恢复正常的现象。T3 组在割第 4、5、6 和 9 刀时, 死皮等级都为 1 级, 但第 10 刀时, 无死皮现象; T4 组的死皮发生率先从第 3 刀的 20% 上升到第 5 刀的 60% 又降低到第 10 刀的 40%, 死皮发生等级最高 3 级, 最终降为 1 级; T5 组的死皮发生率断断续续维持在 20%, 死

皮等级 1 ~ 2 级; 从死皮发生等级来看, 第 8 刀时不同处理组的死皮等级都有下降。上述结果说明较低浓度(T2 组)的铝处理对死皮病的发生无影响, 高浓度的铝处理可能会诱发橡胶树死皮的发生, 但随着处理时间的延长影响变小。

3 讨论

3.1 剖面铝处理对胶乳产量的影响 一般来说, 幼苗比成熟植物更容易受到铝的影响^[20]。铝离子对 2 蓬叶‘热研 7-33-97’橡胶苗造成伤害的阈值

表 1 剖面不同铝处理死皮病的发生率

Tab. 1 Comparison of the incidence of tapping panel dryness (TPD) among different Al treatments

处理 Treatment	死皮发生率 TPD rate/%									
	第1刀	第2刀	第3刀	第4刀	第5刀	第6刀	第7刀	第8刀	第9刀	第10刀
T0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3	0	0	0	20	20	20	0	0	20	0
T4	0	0	20	40	60	40	60	60	40	40
T5	20	0	20	0	0	20	20	20	0	0

注: 每个处理5株橡胶树。

Note: Each treated 5 rubber trees.

表 2 剖面不同铝处理的死皮发生等级

Tab. 2 Comparison for the grade of tapping panel dryness disease in different Al treatment

处理 Treatment	死皮发生等级 TPD grade									
	第1刀	第2刀	第3刀	第4刀	第5刀	第6刀	第7刀	第8刀	第9刀	第10刀
T3-2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
T4-1	0	0	0	0	2	2	2	1	0	0
T4-3	0	0	0	2	2	2	2	1	1	1
T4-5	0	0	2	1	1	0	3	2	1	1
T5-1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
T5-4	0	0	0	0	2	2	2	1	0	1

注: 每个处理5株橡胶树, T3-2等是相应铝浓度处理过后出现死皮的植株编号。

Note: Each treatment included 5 rubber trees. T3-2 and others are plant numbers showing dead skin after treatment with corresponding aluminum concentrations.

在 $100 \sim 200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ [14]。考虑到成熟橡胶树对铝胁迫的抗性提高, 研究中设定了最高 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铝处理浓度。由于有毒铝离子仅发生在低 pH 的情况下, 实验设置 pH 为 7.0 的 T0 和 pH 为 4.2 的 T1 两个对照组, 以排除低 pH 对橡胶树造成的一些影响。因橡胶树产排胶是一个复杂的生理过程, 受到温度、湿度、太阳光照、土壤肥力、刺激剂、橡胶树品种等多种因素的影响 [21-22]。铝是一种营养元素 [23], 高浓度铝降低了大多数植物对磷、铁、钾、钙、镁等必需营养元素的吸收, 导致植物生长减缓 [24-25]。本研究选择外界自然生长条件相对一致以及生长状况相似的橡胶树, 通过剖面喷洒铝溶液模拟高浓度铝对橡胶树胶乳产量的影响。结果显示, pH 的降低和 $50 \sim 400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 剖面铝处理对 30 d 内 10 刀的胶乳产量和干胶产量无显著影响, 但是, 其改变了产排胶的规律, 导致处理早中期胶乳产量和中期干胶产量显著高于对照, 后期显著降低, 各处理间也有部分差异。与 T1 组比较显示, 这种变化和 pH 的降低有一定的关系, 但不同铝浓度处理的效果更为显著。上述结果说明铝处理可能刺激橡胶树的排胶或者产胶性能, 短时间增加排胶体积和干胶产量, 但随着时间的推移这种作用变弱, 甚至可能由于影响产排胶性能, 造成后期胶乳产量下降, 也许更低浓度 (低于 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的铝刺激剖面可能有利于促进橡胶树产排胶, 也对植物生长无影响。

3.2 剖面铝处理对胶乳产排胶生理参数的影响

橡胶树胶乳产量决定于 2 个因素: 即排胶和 2 次

割胶间胶乳的再生。干胶含量、BI 和硫醇含量与排胶性能密切相关 [26]。pH 降低和铝溶液处理胶乳的干胶含量显著高于对照, 表明有较高的产胶潜力 [27], 但过高的干胶含量会使得排胶困难 [28]。铝处理后胶乳 BI 显著提高, 一般来说, BI 与胶乳的产量负相关 [26]; 硫醇含量一般与胶乳的产量正相关 [27], 铝处理后胶乳的硫醇浓度显著升高, 上述 3 个指标与排胶体积的变化趋势有一定的相关性。剖面铝处理对胶乳再生相关参数也有影响, 胶乳中蔗糖含量是橡胶树产胶潜力的重要指标。在正常割胶的健康树中, 胶乳蔗糖含量高标志着蔗糖供应充足, 橡胶树产胶潜力高 [29], 剖面铝处理会极显著降低胶乳蔗糖含量。Mg²⁺ 含量与胶乳的产量正相关 [26], $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理显著降低中后期胶乳 Mg²⁺ 含量。综合上述参数可以发现, 铝溶液处理导致排胶和胶乳再生困难, 可能降低后续的胶乳产量。铝处理后割 10 刀的排胶体积和干胶产量的动态变化也佐证了这一点。较高的无机磷含量有利于胶乳的再生, 与胶乳产量呈极显著正相关 [26], 但 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 铝处理显著增加了后期胶乳无机磷的含量。而且, 剖面外施所有浓度的铝溶液对胶乳 pH 无影响, 但外施低 pH 的溶液可以降低胶乳的蔗糖含量, 降低潜在的胶乳再生能力。杨焱等 [29] 通过比较 6 个橡胶树无性系的生长和产胶能力, 结果发现, 硫醇、蔗糖含量与胶乳产量达到极显著正相关, 干胶含量与胶乳产量呈显著负相关, 这说明铝处理导致处理后同时期的胶乳干胶含量增加、排胶困难, 蔗糖含量下降, 胶

乳合成速率降低。

3.3 剖面铝处理对死皮病的影响 TPD 是严重影响橡胶树胶乳产量的生理综合征^[30]。TPD 由割胶和乙烯利的刺激导致活性氧的过度积累,引起细胞氧化损伤和原位乳胶凝固造成^[31],因此,胶乳活性氧产生和清除失衡是导致橡胶树发生死皮的一个重要因素。 H_2O_2 是在生长因子和细胞因子的控制下由 40 多种酶产生的关键氧化还原信号^[32]。胶乳 H_2O_2 的含量在铝处理早期上升。而 TPD 的实际测定结果显示,高浓度铝处理实际增加了 TPD 的发生率,但有些在处理后期第 4、第 5 刀出现的 TPD 在第 10 刀时恢复,这与早期 TPD 形成是可逆的研究相一致。只有在环境和收获胁迫延长的情况下,发生一些组织学变化,如形成的类囊体、木质化的树胶及实质的异常分裂,会导致这种严重且不可逆的 TPD(褐皮病)^[33]。第 8 刀时死皮等级下降和死皮发生率降低可能是由于铝处理一段时间后,其影响已逐步消退反而有利于死皮的恢复。因此,要深入弄清剖面铝处理对橡胶树死皮发生发展情况的影响,有必要通过长期持续施加铝胁迫予以确认。

3.4 胶乳生理生化参数的意义 橡胶树产排胶是一个复杂的生理过程,胶乳的生理参数也有多种意义,有些参数与排胶和胶乳再生都相关,如 Mg^{2+} 含量、干胶含量和 BI 等参数与排胶相关,也与死皮密切相关^[26]。有些参数与胶乳再生相关,如蔗糖含量和无机磷含量^[26]、干胶含量与死皮程度呈正相关^[34];较高的干胶含量有利于干胶产量的提高,但太高易引起剖面伤口堵塞;本研究的干胶含量大多高于 35%,可能会导致排胶困难,引起死皮^[27]。硫醇浓度随着乙烯利刺激和割胶次数的增加而增加^[29],反映了胶乳对细胞质膜的保护能力,含量高可以延长排胶时间,增加胶乳产量,含量过低可能会造成非酶促保护系统能力的减弱,从而导致死皮^[26]。黄色体膜上存在橡胶合成需要的酶,因此黄色体可能为橡胶合成提供能量^[35]。BI 反映了胶乳中黄色体的完整性,与乳管堵塞、停排及橡胶树死皮密切相关,当 BI 高时会导致致凝物质的释放,引起胶乳原位凝固,从而导致死皮^[26]。所以,为了正确评价剖面铝溶液处理对橡胶树产排胶及其死皮病的发生的影响,要综合各种指标,多方面验证。

4 结 论

利用不同浓度铝溶液处理橡胶树剖面模拟土壤铝毒对橡胶树胶乳产量和死皮发生发展的影响,结果发现,不同浓度的铝溶液处理增加了处理早期的胶乳产量,但 10 刀总的胶乳产量和干胶产量没有显著差异;不同浓度的铝处理降低了胶乳中蔗糖含量和 Mg^{2+} 含量,提高了干胶含量和 BI,对硫醇和无机磷含量也有影响,导致胶乳的排胶和产胶能力都下降;高浓度铝处理导致 TPD 发生率和发生等级增加。因此,50 $mmol \cdot L^{-1}$ 的铝处理可以促进橡胶树胶乳产量的增加,并对胶乳产排胶和 TPD 发生无显著影响;而大于 50 $mmol \cdot L^{-1}$ 的铝处理虽然短期增加了胶乳产量,但会导致死皮病发生率和发生等级增加,不利于长期胶乳产量的增加。

参考文献:

- [1] Ofoe R, Thomas R H, Asiedu S K, et al. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13: 1085998. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085998>
- [2] 郭晴艳, 关统伟, 沈治荣, 等. 酸性土壤铝毒害研究进展与展望 [J]. *现代农业科技*, 2023(9): 147-153.
- [3] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治 [J]. *土壤*, 2013, 45(4): 577-584.
- [4] 沈宏, 严小龙. 铝对植物的毒害和植物抗铝毒机理及其影响因素 [J]. *土壤通报*, 2001, 32(6): 281-285.
- [5] 夏建华, 钟爱平. 铝与植物代谢 [J]. *湖北农学院学报*, 1982(4): 117-122.
- [6] Rahman R, Upadhyaya H. Aluminium toxicity and its tolerance in plant: a review [J]. *Journal of Plant Biology*, 2021, 64(2): 101-121. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09280-4>
- [7] Watanabe T, Okada K. Interactive effects of Al, Ca and other cations on root elongation of rice cultivars under low pH [J]. *Annals of Botany*, 2005, 95(2): 379-385. <https://doi.org/10.1093/aob/mci032>
- [8] Carr S J, Ritchie G, Porter W M. A soil test for aluminium toxicity in acidic subsoils of yellow earths in Western Australia [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1991, 42(5): 875-892. <https://doi.org/10.1071/AR9910875>
- [9] Aparecida Rodrigues L, Martinez H E P, Neves J C L, et al. Growth response of coffee tree shoots and roots to subsurface liming [J]. *Plant and Soil*, 2001, 234(2): 207-214. <https://doi.org/10.1023/A:1017999318532>
- [10] Herrmann L, Bräu L, Robin A, et al. High colonization by native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) of rubber

- trees in small-holder plantations on low fertility soils in North East Thailand [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(7): 1041–1048. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1110238>
- [11] Bolan N S, Adriano D C, Curtin D. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability [M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2003: 215–272.
- [12] Nguyen B T, Do T K, Tran T V, et al. High soil Mn and Al, as well as low leaf P concentration, may explain for low natural rubber productivity on a tropical acid soil in Vietnam [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(7): 903–914. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431674>
- [13] 张晗, 安锋, 袁坤, 等. 不同铝水平胁迫对橡胶树幼苗若干生理指标的影响 [J]. *热带作物学报*, 2014, 35(10): 1992–1996.
- [14] 安锋, 李昌珍, 张婷婷, 等. 铝胁迫对橡胶苗生理和叶绿素荧光特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4191–4198.
- [15] Boyne A F, Ellman G L. A methodology for analysis of tissue sulfhydryl components [J]. *Analytical Biochemistry*, 1972, 46(2): 639–653. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(72\)90335-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(72)90335-1)
- [16] Ashwell G. Colorimetric analysis of sugars [M]// *Methods in Enzymology*. Amsterdam: Elsevier, 1957: 73–105.
- [17] Taussky H H, Shorr E, Kurzmann G. A microcolorimetric method for the determination of inorganic phosphorus [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1953, 202(2): 675–685. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)66180-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)66180-0)
- [18] 程成, 史敏晶, 田维敏. 巴西橡胶树胶乳中黄色体破裂指数测定方法的优化 [J]. *热带作物学报*, 2012, 33(7): 1197–1203.
- [19] 陈慕容, 黄庆春, 叶沙冰, 等. “保 01” 防治橡胶树褐皮病及其作用机理的研究 [J]. *热带作物研究*, 1992, 12(1): 30–37.
- [20] Thawornwong N, Van Diest A. Influences of high acidity and aluminum on the growth of lowland rice [J]. *Plant and Soil*, 1974, 41(1): 141–159. <https://doi.org/10.1007/BF00017951>
- [21] Florez-Velasco N, Ramos V F, Magnitskiy S, et al. Ethylene and jasmonate as stimulants of latex yield in rubber trees (*Hevea brasiliensis*): Molecular and physiological mechanisms. A systematic approximation review [J]. *Advanced Agrochem*, 2024, 3(4): 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2024.07.003>
- [22] Zhai D L, Thaler P, Worthy F R, et al. Rubber latex yield is affected by interactions between antecedent temperature, rubber phenology, and powdery mildew disease [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2023, 67(10): 1569–1579. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02515-2>
- [23] Fung K F, Carr H P, Zhang J, et al. Growth and nutrient uptake of tea under different aluminium concentrations [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(9): 1582–1591. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3254>
- [24] 段宏利, 蒋凌雁, 陈志坚, 等. 铝胁迫对狗牙根根系生长和营养元素的影响 [J]. *草地学报*, 2022, 30(4): 936–942.
- [25] 张婷婷, 刘子凡, 安锋, 等. 铝胁迫造成橡胶苗死亡的机制研究 [J]. *热带作物学报*, 2020, 41(12): 2439–2445.
- [26] 肖再云, 校现周. 巴西橡胶树胶乳生理诊断的研究与应用 [J]. *热带农业科技*, 2009, 32(2): 46–50.
- [27] 丁欢, 杨署光, 蒋毅, 等. 强割和乙烯利刺激对不同品系幼龄橡胶树排胶生理特性的影响 [J]. *林业科学*, 2023, 59(12): 105–116.
- [28] 张晓飞, 黄肖, 左如斌, 等. 3 个橡胶树引进品种的胶乳生理特性研究 [J]. *热带作物学报*, 2021, 42(10): 2869–2874. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2021.10.016>
- [29] 杨焱, 吴裕, 赵祺, 等. 6 个橡胶树优树无性系阶段性综合评价 [J]. *西部林业科学*, 2024, 53(4): 65–71.
- [30] Junaidi, Nuringtyas T R, Clément-Vidal A, et al. Analysis of reduced and oxidized antioxidants in *Hevea brasiliensis* latex reveals new insights into the regulation of antioxidants in response to harvesting stress and tapping panel dryness [J]. *Heliyon*, 2022, 8(7): e09840. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09840>
- [31] Wititsuwannakul R, Pasitkul P, Kanokwiroon K, et al. A role for a *Hevea* latex lectin-like protein in mediating rubber particle aggregation and latex coagulation [J]. *Phytochemistry*, 2008, 69(2): 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.08.019>
- [32] Sies H, Jones D P. Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents [J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2020, 21(7): 363–383. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-0230-3>
- [33] Putranto R A, Herlinawati E, Rio M, et al. Involvement of ethylene in the latex metabolism and tapping panel dryness of *Hevea brasiliensis* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, 16(8): 17885–17908. <https://doi.org/10.3390/ijms160817885>
- [34] 郭秀丽, 孙亮, 胡义钰, 等. 巴西橡胶树不同死皮程度植株的胶乳生理参数分析 [J]. *南方农业学报*, 2016, 47(9): 1553–1557.
- [35] Jacob J L, D’auzac J, Prevôt J C. The composition of natural latex from *Hevea brasiliensis* [J]. *Clinical Reviews in Allergy*, 1993, 11(3): 325–337. <https://doi.org/10.1007/BF02914415>

Effects of treatment of tapping panel with aluminum solutions on latex yield and physiological parameters

Wang Mengyue^{1,2,3#}, Kang Li⁴, Zhao Pingjuan³, Xie Guishui², Liu Zhao²,
Zhang Yingying², Liu Zifan^{1*}, An Feng^{2*}

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. National Observation and Research Station of Tropical Agroecosystems/Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Danzhou, Hainan 571737, China; 3. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding, Haikou, Hainan 571101, China; 4. Yangling Xinshijie Tissue Culture Co., Ltd., Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To clarify the effects of aluminum stress on latex yield, physiological parameters and tapping panel dryness (TPD) of mature rubber trees (*Hevea brasiliensis*), rubber trees of clone Reyan7-33-97 tapped for eight-years were treated with AlCl₃ solution at different concentrations. Two control solutions with different pH values (T0 was treated with ultrapure water of pH7.0 and T1 was treated with ultrapure water solution of pH adjusted to 4.2 by hydrochloric acid) and four concentrations (i.e. 50, 100, 200 and 400 mmol·L⁻¹) of AlCl₃ solutions with pH4.2 were applied just above the tapping cut. The rubber trees were tapped regularly and the latex volume, dry rubber yield, latex physiological parameters, TPD incidence and grade were observed in the early, middle and late stage of the treatment. The results showed that the harvested latex volume and dry rubber yield increased in the early stage of aluminum treatment, decreased to the same level as the control in the middle stage, and was lower than the control in the late stage, while the total latex volume and dry rubber yield of the 10 tappings after Al treatment were not significantly different from those of the control. Aluminum treatment increased dry rubber content, luteoid bursting index of the early latex and thiols content of late latex, indicating that aluminum treatment led to the decrease of latex flow capacity. Meanwhile aluminum treatment decreased latex sucrose content, and Mg²⁺ content of latex at the middle and late stages, and increased the inorganic phosphor content of latex at the late stage, which indicates that aluminum treatment also led to the decrease of rubber regeneration ability. High concentration aluminum treatment increased the incidence and grade of TPD. In summary, aluminum solution with a high concentration of 50 mmol·L⁻¹ can increase latex yield in the short term and maintain the stability of dry latex production in a certain period of time, but it leads to the decline of the latex flow and regeneration capacity, inducing the occurrence of TPD. High concentration of Al is not conducive to maintaining the long-term latex production stability.

Keywords: rubber tree; aluminum; tapping cut; latex yield; latex physiological parameter; tapping panel dryness incidence

(责任编辑:潘学峰)