



斑驳病毒对‘牛尾’山药叶片光合作用的影响

徐馨蕾, 施令祥, 段延碧, 龙雯虹

引用本文:

徐馨蕾,施令祥,段延碧,龙雯虹. 斑驳病毒对‘牛尾’山药叶片光合作用的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(4): 566–572.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4623>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

竹柏2种颜色叶片的光合特性研究

Photosynthetic Characteristics of Two Color Leaves of *Podocarpus nagi*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 177–184 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4134>

不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响

Effects of Heavy Metal Pollution on Photosynthetic Characteristics and Heavy Metal Contents in Forage Leaves under Different Planting Patterns

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 31–40 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4244>

遮荫对裸花紫珠苗期光合特性及总黄酮含量的影响

Effect of Shading on Photosynthetic Characteristics and Total Flavonoid Content of *Callicarpa nudiflora* Seedlings

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 569–578 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3751>

五唇兰对PEG模拟的干旱胁迫响应研究

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 53–61 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4062>

遮荫处理对梅叶冬青叶片形态、光合特性和生长的影响

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 25–34 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4077>

向下翻页，浏览PDF全文

斑驳病毒对‘牛尾’山药叶片光合作用的影响

徐馨蕾¹, 施令祥², 段延碧³, 龙雯虹^{1*}

(1. 云南农业大学园林园艺学院, 昆明 650201; 2. 曲靖市富源县经济作物技术推广站, 云南 富源 655500; 3. 云南农业大学农科教学实验中心, 昆明 650201)

摘要: 为了解斑驳病毒对‘牛尾’山药叶片光合作用的影响, 对不同病害程度的‘牛尾’山药叶片的叶绿素和光合日变化进行了测定。结果表明, 轻病植株的叶片叶绿素 a 和总叶绿素显著低于健康植株, 重病植株的叶绿素 b 和类胡萝卜素也较健康植株低, 但轻病植株与健康植株间无显著差异。斑驳病毒侵染山药后, 轻病和重病植株的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均低于健康植株, 但胞间 CO₂ 浓度与健康植株间无显著差异。这表明山药感染斑驳病毒后光合效率下降, 从而导致生理机能受到影响。

关键词: 山药; 斑驳病毒病; 叶绿素; 光合特性

doi: 10.11926/jtsb.4623

Effects of Yam Mottle Virus Disease on Photosynthesis of *Dioscorea opposita* ‘Niuwei’ Leaves

XU Xinlei¹, SHI Lingxiang², DUAN Yanbi³, LONG Wenhong^{1*}

(1. College of Landscape and Horticulture, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Station of Cash Crop at Fuyuan County in Qujing City, Fuyuan 655500, Yunnan, China; 3. Agricultural Teaching Experiment Center, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to understand the effect of mottle virus on the photosynthesis of yam (*Dioscorea opposita*) ‘Niuwei’, the diurnal changes in chlorophyll and photosynthesis in leaves with different degrees of mottle virus disease were measured. The results showed that the contents of chlorophyll a and total chlorophyll of mildly infected plants were significantly lower than those of healthy plants, and the contents of chlorophyll b and carotenoids of seriously infected plants were also lower than those of healthy plants, but there was no significant difference in chlorophyll b and carotenoids between mildly infected plants and healthy plants. After mottle virus infected yam, the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of mildly and seriously infected plants were also lower than those of healthy plants, but the intercellular CO₂ concentration had not significant difference from that of healthy plants. Therefore, it was indicated that the photosynthetic efficiency of yam decreased after infected with mottled virus, thus causing the physiological function to be affected.

Key words: *Dioscorea opposita*; Mottle virus disease; Chlorophyll; Photosynthetic characteristics

山药(*Dioscorea opposita*)具有增强免疫、抗衰老、抗癌等功效^[1]。山药是以块茎和零余子等营养器官进行无性繁殖, 在引种、繁殖和生产过程中易受到山药病毒病的交叉感染、潜伏侵染和蔓延扩

散。山药病毒病发生普遍, 山药不同品种的染病程度不同, 河南温县怀山药病毒病发病率可高达 50%^[2]; 河北保定田间病毒病植株发病率约为 30%^[3]; 广西山药品种中 DNA 病毒 Badna-virus 的

收稿日期: 2022-02-18 接受日期: 2022-04-12

基金项目: 校企合作项目(KX142020067)资助

This work was supported by the Project for School Enterprise Cooperation (Grant No. KX142020067).

作者简介: 徐馨蕾(1996年生), 女, 硕士研究生, 从事山药等蔬菜作物育种与资源评价研究。E-mail: 735233846@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lwh57@sina.com

发病率最高, YMMV 病毒感染率其次, 感染 2 种病毒的约占 16.67%^[4]; 江西瑞昌山药的病毒病发病率最高达 50%, 主要为 JYMV 病毒浸染^[5]; 参薯 (*Dioscorea alata*) 中 YVX 病毒病感染率为 16.2%^[6]。山药病毒病害主要有薯蕷潜隐病毒(*dioscorea latent virus, DLV*)^[7]、中国淮山药坏死花叶病毒(*Chinese yam necrotic mosaic virus, CYNMY*)^[8]、薯蕷绿带花叶病毒(*dioscorea-banding mosaic virus, DGBMV*)^[9]、参薯环斑病毒(*dioscorea alata ring mottle virus, DARMV*)、山药斑驳病毒(*yam mottle virus, YMOV*)^[10]、淮山药温和花叶病毒(*yam mild mosaic virus, YMMV*)^[11-12]、日本山药花叶病毒(*Japanese yam mosaic virus, JYMV*)^[11]、马铃薯 X 和 M 病毒(*potato virus X, M, PVX, PVM*)^[6] 等。

光合作用是植物生长发育和实现经济价值的主要途径^[13]。叶片是植物进行光合作用的主要场所。有研究表明, 人参(*Panax ginseng*) 感染病毒病时, 株高只有健康植株的 1/5, 叶片总面积也只有健康植株的 1/4~1/6, 根质量只有健康植株的 1/2^[14], 严重影响人参的光合作用。花叶病毒侵入淮安红椒 (*Capsicum annuum* var. *grossum*) 后, 开花结果期出现叶片斑驳、植株矮化的病症^[15]。烟草(*Nicotiana tabacum*) 被烟草环斑坏死病毒^[16]、番茄(*Lycopersicon esculentum*) 被番茄不孕病毒^[17] 侵染后植株的光合速率明显降低^[18]。柑橘叶斑驳病毒(*citrus leaf blotch virus, CLB*) 侵染猕猴桃(*Actinidia chinensis*) 后表现出花叶、明脉间叶片黄化症状^[19]。山药病毒病害有多种, 当病毒入侵山药时, 会改变叶片内细胞的代谢途径, 导致山药的生理机能受到影响, 严重时可使山药坏死, 植株萎缩矮化且地下块根畸形^[20], 品质变劣, 甚至丧失经济价值。对于‘牛尾’山药感染斑驳病毒病后的光合作用研究还鲜有报道, 本研究主要探究山药斑驳病毒病对‘牛尾’山药光合作用特性的影响, 为深入研究山药斑驳病毒病的农业生产特性提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验地点位于云南省昆明市盘龙区阿子营镇露地种植田和云南农业大学校内试验基地大棚内。试验材料为云南省禄丰县‘牛尾’山药 (*Dioscorea opposita* ‘Liuwei’), 露地种植的山药发病较重、叶

片黄化斑驳明显(叶片 90% 以上面积斑驳), 大棚种植的山药发病较轻、叶片黄化斑驳不明显(仅叶片中间约 30% 面积斑驳)。经 RT-PCR 检测, 均受 YMOV 病毒侵染(引物分别为 5'-ATTGTGGTTCATGCAGT-TGCAGG-3' 和 5'-ATATACAACAAGTGCAACTAACACG-3', 由云南农业大学兰平秀博士惠赠)。

1.2 叶片光合色素含量的测定

2021 年 7 月 14 日和 17 日在山药旺盛生长期, 分别在阿子营镇和云南农业大学采集山药叶片测定光合色素含量。选相同大小的健康叶片和病株叶片各 3 片, 设 3 次重复。避开叶片叶脉精确称 0.1 g 新鲜叶片, 将叶片放入 25 mL 的棕色容量瓶中, 加入混合浸提液(无水乙醇:丙酮:水=4.5:4.5:1) 20 mL, 黑暗处理 24 h, 定容至 25 mL; 用 AOE 翱艺 A580 型双光束紫外可见分光光度计测量吸光度, 以浸提液为空白对照。计算叶绿素 a、b 和类胡萝卜素及总叶绿素含量, 叶绿素 a 含量(Chl a, mg/L)= $12.21A_{663}-2.81A_{646}$, 叶绿素 b 含量(Chl b, mg/L)= $20.13A_{646}-5.03A_{663}$, 类胡萝卜素含量($\text{C}_r, \text{mg/L}$)= $(1000A_{470}-3.27C_a-104C_b)/229$, 总叶绿素含量(Chl a+b)= $\text{Chl a}+\text{Chl b}$, 式中, A_{663} 、 A_{646} 和 A_{470} 分别为色素提取液在波长 663、646 和 470 nm 下的吸光度。

1.3 叶片光合气体交换参数日变化的测定

2021 年 7 月 27 日和 2021 年 8 月 4 日(山药旺盛生长期)分别在阿子营镇和云南农业大学, 选取位置相近、长势一致、向阳的健康植株和带病毒病植株叶片各 3 片, 采用 Li-6400 便携式光合测定仪测定净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度。从 8:00 到 18:00, 每隔 2 h 测定 1 次。两地都在田间选 3 个种植区进行测定, 作为 3 次重复。

1.4 数据的统计分析

采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析和方差分析, 采用邓肯检验法进行多重比较。

2 结果和分析

2.1 叶片光合色素的含量

由表 1 可见, 阿子营镇的健康植株和重病植株叶片的光合色素含量存在显著差异, 重病植株的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量显著低于健康植株(分别低 22.22%、24.49%和 11.11%), 重病植株的总叶绿素含量极显著低于健康植株(降低 23.44%)。大棚种植的轻病植株的叶绿素 a 和总叶绿素含量也

表 1 健康植株和带病毒植株光合色素含量比较

Table 1 Comparison of photosynthetic pigment content between healthy plants and virus infected plants

地点 Place	状态 State	Chl a (mg/g)	Chl b (mg/g)	Chl a+b (mg/g)	Car (mg/g)
阿子营 Aziying	重病 Serious infection	1.440±0.058b	0.490±0.011b	1.920±0.059bA	0.360±0.014b
	健康 Healthy	1.760±0.063a	0.610±0.032a	2.370±0.095aB	0.400±0.014a
云南农业大学 Yunnan Agricultural University	轻病 Mild infection	0.964±0.021b	1.240±0.097a	8.816±0.300b	0.930±0.123a
	健康 Healthy	1.448±0.009a	1.918±0.234a	14.465±0.973a	1.116±0.200a

同列数据后不同大、小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。

Data followed different capital and small letters within column indicate significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

显著低于健康植株(分别低 50.28%和 64.09%), 其叶绿素 b 和总类胡萝卜素含量与健康植株的差异不显著。这表明山药感染斑驳病毒病后叶片光合色素含量降低。

2.2 叶片光合气体交换参数的日变化

由图 1 可见, 健康植株的净光合速率基本上都比感病植株高。在阿子营镇, 健康植株叶片的净光合速率在 8:00、10:00、16:00、18:00 均显著高于重病植株, 14:00 时极显著高于重病植株(高 80.01%); 健康植株和重病植株叶片均在 10:00 和 14:00 显著高于 12:00, 18:00 时最低。在云南农业大学, 健康

植株与轻病植株的净光合速率也有差异, 除 12:00 时无显著差异外, 其余时间健康植株均显著高于轻病植株; 健康植株和轻病植株的净光合速率在 10:00 和 14:00 显著高于 12:00, 14:00 后逐渐降低。两地净光合速率的日变化均呈现“双峰”型, 10:00 的光合速率明显高于 14:00。两地健康植株的净光合速率明显高于感染斑驳病毒病植株, 重病和轻病植株在 14:00 分别极显著和显著低于健康植株。

由图 2 可见, 气孔导度的日变化和净光合速率不同, 健康植株和感病植株气孔导度的日变化总体呈现下降的趋势。在阿子营镇, 12:00、14:00 和 18:00

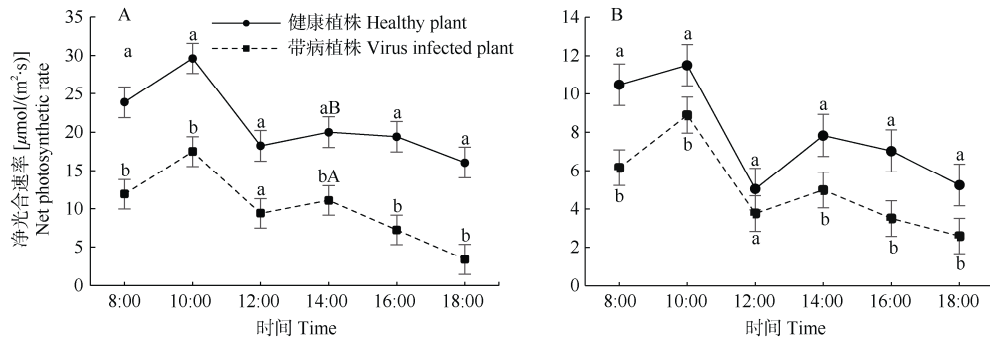


图 1 叶片的净光合速率日变化。A: 阿子营; B: 云南农业大学; 不同大、小写字母分别表示差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。下同

Fig. 1 Diurnal changes in net photosynthetic rate. A: Aziying; B: Yunnan Agricultural University; Different capital and small letters indicate significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same below

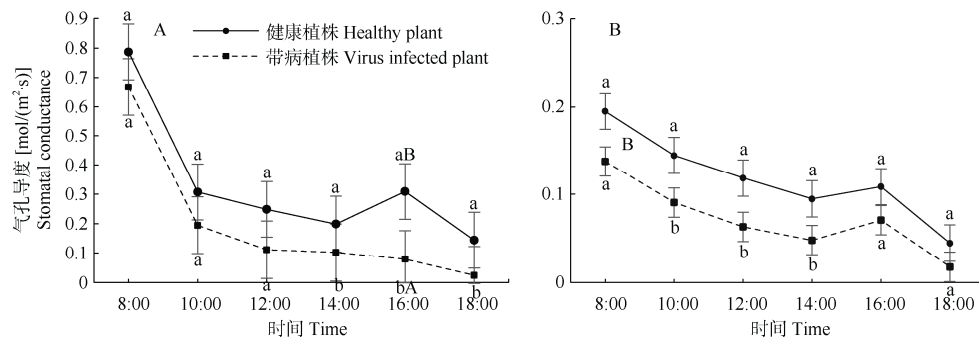


图 2 叶片的气孔导度日变化

Fig. 2 Diurnal changes in stomatal conductance

时重病植株的气孔导度显著低于健康植株, 16:00 时的差异极显著, 8:00 和 10:00 重病植株较健康植株低, 但差异不显著; 健康植株在 16:00 时有明显的上升趋势, 较 14:00 时升高了 55.93%。在云南农业大学, 轻病植株的气孔导度在 10:00、12:00 和 14:00 显著较健康植株低(分别低 58.24%、87.94%、98.33%), 8:00、16:00、18:00 时也低于健康植株, 但差异不显著; 16:00 时健康植株和轻病植株的气孔导度都有明显上升。两地植株的气孔导度日变化总体呈下降的趋势, 8:00 时为最高, 18:00 时最低; 健

康植株和轻病植株在 16:00 有上升, 而重病植株在 16:00 无上升现象。

由图 3 可见, 胞间 CO₂ 浓度的日变化曲线和气孔导度相似, 总体呈现下降趋势。在阿子营镇重病植株的胞间 CO₂ 浓度与健康植株无显著差异。健康植株的胞间 CO₂ 浓度在 12:00 略有升高, 重病植株则逐渐下降。胞间 CO₂ 浓度在两地都是 8:00 时最高, 18:00 最低。两地健康植株在中午 12:00 升高, 感病植株则都呈现下降趋势, 病毒的感染影响了植物午休时胞间 CO₂ 浓度的升高。

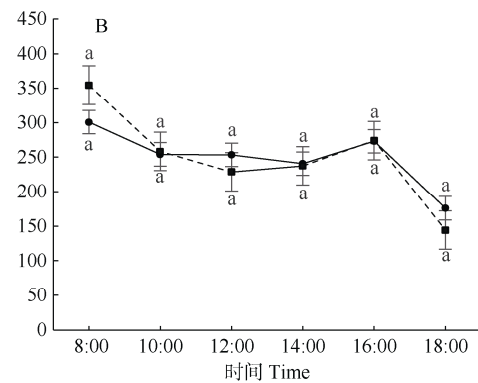
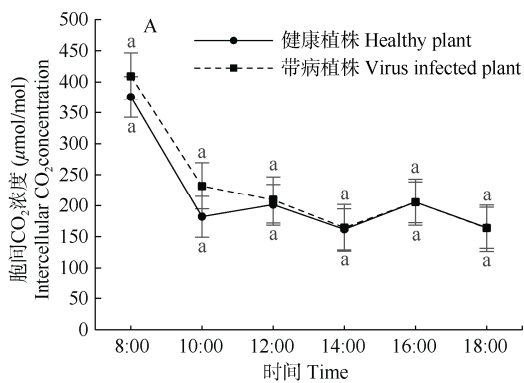


图 3 叶片的胞间 CO₂ 浓度日变化

Fig. 3 Diurnal changes in intercellular CO₂ concentration

由图 4 可见, 阿子营镇健康植株叶片的蒸腾速率在 12:00、14:00、18:00 时显著高于重病植株, 16:00 时达极显著差异。重病植株的叶片蒸腾速率在 12:00 上升较快, 较 10:00 升高了 75.69%, 午休后呈缓慢下降趋势。云南农业大学健康植株的叶片蒸腾速率在 14:00 显著高于轻病植株(高 74.39%), 12:00 时达极显著差异(高 96.84%), 其余时间健康植株较轻病

植株高, 但无显著差异。轻病植株在 16:00 前呈现缓慢升高趋势, 在 16:00 达到最高。两地健康植株的叶片蒸腾速率都较感病植株高, 健康植株在 12:00 上升到最高, 在 16:00 也有明显升高, 呈现双峰型。重病植株在 12:00 达峰值后便开始下降, 轻病植株在 16:00 时达峰值后急速下降。这说明斑驳病毒侵染导致植株蒸腾速率降低。

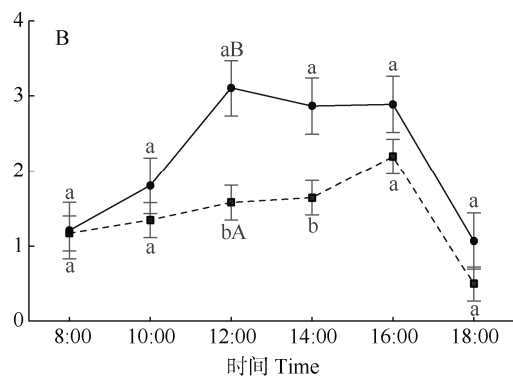
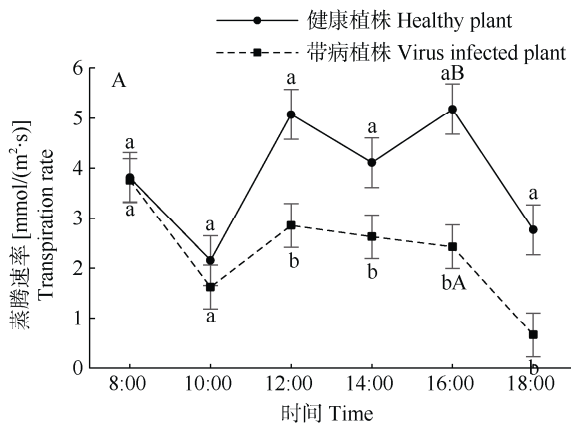


图 4 叶片的蒸腾速率日变化

Fig. 4 Diurnal changes in transpiration rate

3 结论和讨论

本研究结果表明,相同生长期的山药健康植株的叶绿素含量和类胡萝卜素较感染斑驳病毒植株的高,且健康植株和带病植株间的总叶绿素含量都呈极显著差异。植物在感染病毒后,叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量都显著下降,但在病症较轻时叶绿素 b 和总类胡萝卜素含量下降不显著。植物在病毒入侵后叶片细胞中的叶绿素含量减少,叶片细胞坏死、解体,运输营养物质的韧皮部受到阻碍,最终影响光合产物的有机物分配^[21]。在叶绿体中的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素主要负责收集光能,在叶绿体中的单位含量直接决定着植物光合作用的强弱^[22]。光合作用产生的能量是植物生命活动的来源^[23]。叶绿素是光合作用能量转化的机器,叶绿素的含量与光合作用的强弱成正相关趋势。本研究结果表明,山药斑驳病毒影响山药叶片光合色素含量,发病越严重对光合色素含量的影响越大,山药斑驳病毒病可能主要通过降低叶绿素 b 和类胡萝卜素含量来影响光合作用。

本研究在两个试验点进行光合参数的测定,结果表明健康植株叶片的净光合速率明显高于感病植株,净光合速率曲线呈现双峰型,有轻微的午休现象,细毛山药(*Dioscorea opposita*)也有这一现象^[24]。光合作用的日变化反映了植物的光合能力的强弱,光合作用强则产量也相应较高,反之则低^[25]。有些植物在中午 12:00 会出现‘休眠现象’,所以光合速率会出现双峰值,还有一些植物则没有‘休眠现象’,光合速率曲线则呈现单峰型。本研究中,健康植株在 14:00 出现第 2 个峰值后缓慢下降,而感病植株则快速下降,说明斑驳病毒影响了植物叶片的净光合速率。光合作用的强弱对植物的生物产量和经济价值起决定性作用^[26]。当光合速率强烈时光合作用也随之增强,产生的有机物随之增多,植物体的生长发育状况良好最终会获得较好的经济效益。斑驳病毒影响了植物的净光合速率,光合作用也随之降低,影响植物的有机物合成,最终导致植株生长缓慢。

植物的光合速率受多种因素的影响^[27],而气孔作为 CO₂ 进入植物体内的通道,对植物的光合作用起着至关重要的作用^[28]。气孔导度在 12:00 前迅速下降,而净光合速率在 12:00 也下降,这与气孔关闭影响 CO₂ 进入有关。盾叶薯蓣(*D. zingiberensis*)

和黄山药(*D. panthaica*)也表现出这一特性^[29]。气孔是 CO₂ 进入细胞内的唯一途径,本研究结果表明,感染斑驳病毒的山药植株的气孔导度总体都比健康植株低,这也是导致感病植株光合作用低的重要原因之一。

CO₂ 是光合作用的重要原料,对光合作用起着至关重要的作用^[30]。在番茄感染番茄黄花曲叶病毒(tomato yellow leaf curl virus, TYLCV)^[31]、TMV 病毒^[32]侵染烟草后,叶片的净光合速率也明显降低,而胞间 CO₂ 浓度则有所提高。本研究中,健康植株的胞间 CO₂ 浓度在 12:00 和 16:00 有两次升高,而感病植株只在 16:00 时有 1 次升高。这可能是感病植株的净光合速率和气孔导度下降导致胞间 CO₂ 浓度较健康植株略高。

蒸腾作用是将植物体内的水分以水蒸汽的形式通过叶片散发到大气中的过程。在正午太阳光照射较强时蒸腾作用可降低植物叶片表面的温度,防止叶片灼伤^[22]。感病植物的蒸腾速率较低,水分利用效率也较低,导致对温度的调节能力差,出现叶片灼伤,导致光合能力下降^[33]。本研究结果表明,健康的‘牛尾’山药植株的叶片蒸腾速率日变化曲线呈现双峰型,在 12:00 和 16:00 出现峰值;感病植株的蒸腾速率低于健康植株;轻病植株只有 1 个峰值(在 16:00),16:00 后急剧下降;重病植株的蒸腾速率在 12:00 后开始下降。这说明斑驳病毒病使山药叶片蒸腾速率降低,可能影响叶片温度的调节,从而对 CO₂ 的吸收利用。

综上,感染山药斑驳病毒病的‘牛尾’山药植株叶片的叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等均低于健康植株,这为后续研究‘牛尾’山药斑驳病毒病提供了理论依据。

参考文献

- [1] KERDKANKAEW S, LUANGJAME J, KHUMMONGKOL P. Effects of photosynthetically active radiation and air temperature on CO₂ uptake of *Pterocarpus macrocarpus* in the open field [J]. Agric Sci China, 2005, 4(4): 263–272.
- [2] LI M J, ZHANG F, CHEN M X, et al. Study on virus diseases of *Dioscorea opposita* [J]. Chin Trad Herb Drugs, 2003, 34(11): 100–102. [李明军, 张峰, 陈明霞, 等. 怀山药病毒病的研究 [J]. 中草药, 2003, 34(11): 100–102. doi: 10.3321/j.issn:0253-2670.2003.11.043.]
- [3] CHEN H Y, LIU X Y, QI H R, et al. Preliminary report on the main diseases of yam and damage characteristics [J]. China Plant Prot, 2010,

- 30(6): 24–26. [陈红岩, 刘晓芸, 齐红茹, 等. 保定市山药病害种类及为害特点调查初报 [J]. 中国植保导刊, 2010, 30(6): 24–26. doi: 10.3969/j.issn.1672-6820.2010.06.007.]
- [4] ZOU C W, MENG J R, WEI B H, et al. Identification of new pathogen of Huai yam virus disease by deep sequencing [C]// Proceedings of 2012 Academic Annual Meeting of Chinese Society of Plant Pathology. Qingdao: Chinese Society of Plant Pathology, 2012: 225. [邹承武, 蒙姣荣, 韦本辉, 等. 利用深度测序技术鉴定淮山药病毒病新病原 [C]// 中国植物病理学会 2012 年学术年会论文集. 青岛: 中国植物病理学会, 2012: 225.]
- [5] HUANG T. Preliminary study on pathogen of Ruichang yam anthracnose and pathogenic identification of the virus and nematode diseases [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015. [黄婷. 瑞昌山药炭疽病菌初步研究及其病毒和线虫病害病原鉴定 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.]
- [6] ZOU C W. Disease survey, diagnosis, and molecular characterization of viruses infecting yam in China [D]. Nanning: Guangxi University, 2014. [邹承武. 中国淮山药病毒病调查、诊断和病原病毒分子生物学研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2014.]
- [7] LIU Z, PENG Q P, XIANG Y Y, et al. Damage and control of viral diseases on common medicinal plants in China [J]. *Plant Prot*, 2018, 44(1): 9–19. [刘舟, 彭秋平, 向云亚, 等. 我国常见药用植物病毒病的危害与防控 [J]. 植物保护, 2018, 44(1): 9–19. doi: 10.16688/j.zwbh.2017380.]
- [8] KWON S J, CHO I S, CHOI S K, et al. Complete sequence analysis of a Korean isolate of Chinese yam necrotic mosaic virus and generation of the virus specific primers for molecular detection [J]. *Res Plant Dis*, 2016, 22(3): 194–197. doi: 10.5423/RPD.2016.22.3.194.
- [9] HE Z, CHEN C F, ZHANG Z X, et al. Advances in molecular evolution of viruses in the family Potyviridae [J]. *Plant Prot*, 2017, 43(3): 13–22. [贺振, 陈春峰, 张志想, 等. 马铃薯 Y 病毒科分子进化研究进展 [J]. 植物保护, 2017, 43(3): 13–22. doi: 10.3969/j.issn.0529-1542.2017.03.003.]
- [10] LAN P X, MENG Y, SHEN P, et al. Complete genome sequence of yam chlorotic necrosis virus, a novel macluravirus infecting yam [J]. *Arch Virol*, 2018, 163(8): 2275–2278. doi: 10.1007/s00705-018-3851-5.
- [11] ZOU C W, MENG J R, SONG J J, et al. Investigation of yam virus disease and identification of virus pathogen in Huaishan, Guangxi [C]// Proceedings of the 2011 Annual Meeting of the Chinese Society of Plant Pathology. Yichang: Chinese Society of Plant Pathology, 2011: 288. [邹承武, 蒙姣荣, 宋静静, 等. 广西淮山药病毒病调查及病毒病原鉴定 [C]// 中国植物病理学会 2011 年学术年会论文集. 宜昌: 中国植物病理学会, 2011: 288.]
- [12] HE Z, HUANG T, QIN S L, et al. Pathogen identification of Ruichang yam virus disease [C]// Proceedings of 2016 Academic Annual Meeting of Chinese Society of Plant Pathology. Nanjing: Chinese Society of Plant Pathology, 2016: 280. [贺哲, 黄婷, 秦双林, 等. 瑞昌山药病毒病原鉴定 [C]// 中国植物病理学会 2016 年学术年会论文集. 南京: 中国植物病理学会, 2016: 280.]
- [13] WEN G Q, LIU Y X, NONG M L, et al. Effects of plant growth regulators (combination) on leaf photosynthesis of yam in South China [J]. *SW China J Agric Sci*, 2016, 29(7): 1590–1594. [温国泉, 刘永贤, 农梦玲, 等. 不同植物生长调节剂对南方淮山药叶片光合作用的影响 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(7): 1590–1594. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2016.07.016.]
- [14] TIAN C G, ZHANG Z W, WANG Z Q. Observation on the field incidence of ginseng virus disease [C]// Proceedings of 2008 China Jilin International Ginseng Conference. Changchun: Jilin Provincial People's Government, Chinese Pharmacological Society, 2008. [田成刚, 张占伟, 王稚琪. 人参病毒田间发病规律的观察 [C]// 2008 中国-吉林国际人参大会论文集. 长春: 吉林省人民政府, 中国药理学学会, 2008.]
- [15] WANG W W, WANG G L, SUN Y D, et al. Effect of mosaic virus on appearance quality and yield of Huai'an red pepper [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2021, 62(10): 1968–1969. [王玮玮, 汪国莲, 孙玉东, 等. 花叶病毒对淮安红椒外观品质及产量的影响 [J]. 浙江农业科学, 2021, 62(10): 1968–1969. doi: 10.16178/j.issn.0528-9017.20211021.]
- [16] LI F, CHEN H R. Studies on plant viruses associated with tobacco diseases [J]. *J Yunnan Agric Univ*, 2001, 16(2): 160–166. [李凡, 陈海如. 引起烟草病害的病毒种类研究 [J]. 云南农业大学学报, 2001, 16(2): 160–166. doi: 10.3969/j.issn.1004-390X.2001.02.022.]
- [17] YING F Q, LIU Z L, HUANG W, et al. Detection and analysis of tomato virus diseases in spring in Henan Province [J]. *China Fruit Veget*, 2017, 37(9): 30–32. [应芳卿, 刘宗立, 黄文, 等. 河南省春季番茄病毒病种类检测分析 [J]. 中国果菜, 2017, 37(9): 30–32. doi: 10.19590/j.cnki.1008-1038.2017.09.009.]
- [18] ZHU C W, ZHU J G, CAO J, et al. Biochemical and molecular characteristics of leaf photosynthesis and relative seed yield of two contrasting rice cultivars in response to elevated [CO₂] [J]. *J Exp Bot*, 2014, 65(20): 6049–6056. doi: 10.1093/jxb/eru344.
- [19] ZHU C X, WANG G P, ZHENG Y Y, et al. RT-PCR detection and sequence analysis of coat protein gene of citrus leaf blotch virus infecting kiwifruit trees [J]. *Acta Phytopathol Sin*, 2016, 46(1): 11–16. [朱晨熹, 王国平, 郑亚洲, 等. 来源于猕猴桃的柑橘叶斑驳病毒的 RT-PCR 检测及外壳蛋白基因序列分析 [J]. 植物病理学报, 2016, 46(1): 11–16. doi: 10.13926/j.cnki.apps.2016.01.002.]

- [20] HUANG T, JIANG J X, YU G Q, et al. Latest advance in researches on *Dioscorea opposita* Thunb. diseases [J]. Biol Dis Sci, 2014, 37(1): 74–78. [黄婷, 蒋军喜, 余国庆, 等. 山药病害最新研究进展 [J]. 生物灾害科学, 2014, 37(1): 74–78. doi: 10.3969/j.issn.2095-3704.2014.01.014.]
- [21] CAO X C, ZHONG C, ZHU L F, et al. Glycine increases cold tolerance in rice via the regulation of N uptake, physiological characteristics, and photosynthesis [J]. Plant Physiol Biochem, 2017, 112: 251–260. doi: 10.1016/j.plaphy.2017.01.008.
- [22] WU Y W, LI Q, JIN R, et al. Effect of low-nitrogen stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of maize cultivars with different low-nitrogen tolerances [J]. J Integr Agric, 2019, 18(6): 1246–1256. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62030-1.
- [23] FENG L Y, RAZA M A, LI Z C, et al. The influence of light intensity and leaf movement on photosynthesis characteristics and carbon balance of soybean [J]. Front Plant Sci, 2019, 9: 1952. doi: 10.3389/fpls.2018.01952.
- [24] XU H J, GONG X D. Study on the photosynthetic properties of some local fine root hair yam varieties [J]. Seed, 2010, 29(5): 19–21. [徐恒戩, 巩旭东. 地方细毛山药品种光合特性的研究 [J]. 种子, 2010, 29(5): 19–21. doi: 10.3969/j.issn.1001-4705.2010.05.006.]
- [25] PADHAN B, PANDA D. Variation of photosynthetic characteristics and yield in wild and cultivated species of yams (*Dioscorea* spp.) from Koraput, India [J]. Photosynthetica, 2018, 56(4): 1010–1018. doi: 10.1007/s11099-018-0823-7.
- [26] THINH N C, KUMAGAI E, SHIMONO H, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on morphology of leaf blades in Chinese yam [J]. Plant Prod Sci, 2018, 21(4): 311–321. doi: 10.1080/1343943X.2018.1511377.
- [27] YE Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂ [J]. Chin J Plant Ecol, 2010, 34(6): 727–740. [叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727–740. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.06.012.]
- [28] ZOU W T, WANG Y J, CAO Z, et al. Effects of heavy metal pollution on photosynthetic characteristics and heavy metal contents in forage leaves under different planting patterns [J]. J Trop Subtrop Bot, 2021, 29(1): 31–40. [邹文桐, 王艳君, 曹智, 等. 不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(1): 31–40. doi: 10.11926/jtsb.4244.]
- [29] XU Y J, GUO H C. Comparison on the photosynthetic characteristics of *Dioscorea zingiberensis*, *D. panthica* and *D. parriflora* [J]. J Yunnan Agric Univ, 2004, 19(4): 409–412. [徐亚军, 郭华春. 盾叶薯蓣、黄山药、小花盾叶薯蓣的光合特性比较 [J]. 云南农业大学学报, 2004, 19(4): 409–412. doi: 10.3969/j.issn.1004-390X.2004.04.011.]
- [30] TAY S, HE J, YAM T W. Photosynthetic light utilization efficiency, water relations and leaf growth of C₃ and CAM tropical orchids under natural conditions [J]. Am J Plant Sci, 2015, 6(18): 2949–2959. doi: 10.4236/ajps.2015.618290.
- [31] YU L, GUO S R, ZHU W M, et al. Effects of tomato yellow leaf curl virus on photosynthetic characteristics and chloroplast ultra-structure of the tomato leaves [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2011, 31(7): 1355–1359. [于力, 郭世荣, 朱为民, 等. 番茄黄化曲叶病毒对番茄叶片光合特性和叶绿体超微结构的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1355–1359.]
- [32] NI G S, ZHANG X J, BI Q W, et al. Changes in photosynthesis characteristics of flue-cured tobacco infected with tobacco mosaic virus [J]. Chin Tobacco Sci, 2010, 31(5): 58–61. [倪国仕, 章新军, 毕庆文, 等. 受烟草花叶病毒侵染程度不同的烤烟叶片光合特性的变化 [J]. 中国烟草科学, 2010, 31(5): 58–61. doi: 10.3969/j.issn.1007-5119.2010.05.012.]
- [33] HAN Z M, WANG Y H, HAN M, et al. Comparative study on photosynthesis of medicinal plant *Saposhnikovia divaricata* in different periods [J]. Acta Ecol Sin, 2009, 29(3): 1382–1390. [韩忠明, 王云贺, 韩梅, 等. 药用植物防风(*Saposhnikovia divaricata*)不同时期光合作用特性比较 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1382–1390.]