

纳米 SiO₂ 对髯毛箬竹叶片光合特征参数日变化的影响

李 博^{1,2}, 陶功胜¹, 王 林¹, 谢寅峰^{1,①}

(1. 南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 江苏连云港市委农村工作办公室, 江苏 连云港 222003)

摘要: 采用叶面喷施的方法,研究了 0 (CK)、150、300 和 450 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 对髯毛箬竹 (*Indocalamus barbatus* McClure) 叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔限制值和水分利用效率等光合特征参数日变化 (7:00 至 16:00) 的影响。结果表明: 对照组髯毛箬竹叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和气孔限制值的日变化曲线均为“双峰”型, 有明显的“午休”现象; 胞间 CO₂ 浓度的日变化曲线则为“W”型; 水分利用效率的日变化曲线为“U”型。与对照相比, 喷施 150、300 和 450 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 均能不同程度提高髯毛箬竹叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 减小气孔限制值及胞间 CO₂ 浓度的变化幅度, 提高“午休”时的水分利用效率, 缓解光合作用的“午休”现象; 其中, 300 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组的效果最佳, 在出现最大峰值的 10:00 时 300 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别比对照提高了 13.98%、71.21% 和 49.09%, 且均与对照差异显著 ($P < 0.05$)。综合分析结果说明: 髯毛箬竹叶片光合能力的提高是气孔和非气孔限制因素共同作用的结果, 而喷施适量的纳米 SiO₂ 能够在一定程度上改善非气孔限制因素, 从而增强髯毛箬竹叶片的光合能力。

关键词: 纳米 SiO₂; 髯毛箬竹; 光合特征参数; 日变化

中图分类号: Q945.11; S795.9; TB383 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2011)02-0001-06

Effects of nano-SiO₂ on daily change of photosynthetic characteristic parameters of *Indocalamus barbatus* leaves LI Bo^{1,2}, TAO Gong-sheng¹, WANG Lin¹, XIE Yin-feng^{1,①} (1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Lianyungang Rural Affairs Office of Municipal Party Committee of the Communist Party of China, Lianyungang 222003, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2011, 20(2): 1-6

Abstract: Effects of 0 (CK), 150, 300 and 450 mg · L⁻¹ nano-SiO₂ on daily change (from 7:00 to 16:00) of photosynthetic characteristic parameters including net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, intercellular CO₂ concentration, stomatal limitation value and water use efficiency of *Indocalamus barbatus* McClure leaves were researched by foliar spraying method. The results show that all daily change curves of net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and stomatal limitation value are “double peak” type and have obvious “midday depression” phenomenon, while those of intercellular CO₂ concentration and water use efficiency are “W” type and “U” type, respectively. Compared to the control, spraying 150, 300 and 450 mg · L⁻¹ nano-SiO₂ can increase net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate with different degrees, decrease change range of stomatal limitation value and intercellular CO₂ concentration, improve water use efficiency at “midday depression” and relieve “midday depression” phenomenon of photosynthesis. In which, the effect of 300 mg · L⁻¹ nano-SiO₂ treatment group is the best, net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of this group increase by 13.98%, 71.21% and 49.09% respectively to the control at 10:00 of appearing maximum peak value, and all of them have significant differences to the control ($P < 0.05$). The comprehensive analysis results show that the improvement of photosynthetic capacity of *I. barbatus* is caused by interaction of stomatal and non-stomatal limitation factors, while

收稿日期: 2010-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (39900115); 江苏省高校自然科学基金项目 (05KJB220053); 南京林业大学人才培养模式创新实验区——生物科学专业人才培养模式创新项目

作者简介: 李 博 (1984—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生化研究。

①通信作者 E-mail: xxyyff@njfu.edu.cn

spraying appropriate amount of nano-SiO₂ can improve non-stomatal limitation factor to a certain extent, thus can enhance photosynthetic capacity of *I. barbatus* leaves.

Key words: nano-SiO₂; *Indocalamus barbatus* McClure; photosynthetic characteristic parameter; daily change

纳米材料因其独特结构和优异性能,不仅被广泛应用于电子学、化学、医学等领域,而且在生物学等新领域中的应用也日益受到重视^[1-2]。纳米材料具有促进果蔬保鲜和动植物生长、杀菌、除污染以及防治动植物疾病等多种功效^[3-5]。近年来,有关纳米材料对高等植物生长发育影响作用的研究报道越来越多,如纳米材料对豆类的种子萌发和幼苗生长^[6-7]、菠菜(*Spinacia oleracea* L.)生长过程中的氮代谢^[8]、绿豆[*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek]下胚轴不定根的形成^[9]、树莓(*Rubus swinhoi* Hance)组培苗再生芽的发育^[10]等方面具有促进作用;另外,纳米材料具有特殊的光催化特性,具有促进植物对光能的吸收和分配、光电转换、光合放氧及光合磷酸化的作用,并能提高植物光合性能,与PS II关系密切,但其具体的作用机制尚不明确^[11-13]。与纳米TiO₂相比,纳米SiO₂具有成本低、无毒无害的优点,因此在生产实践中具有更高的应用价值。目前,有关纳米材料对植物生长发育调节作用的研究主要集中在纳米TiO₂对农作物及蔬菜的调节作用方面^[9,11-15],而关于纳米SiO₂对林木生长发育影响的应用研究尚不多见,尤其是有关纳米SiO₂对植物光合特性的影响及其调节作用的研究尚未见报道。

竹类植物具有繁殖快,适应力强,用途广,资源丰富,经济效益、社会效益和生态效益显著等优点,是禾本科(Gramineae)中重要的经济植物之一。髯毛箬竹(*Indocalamus barbatus* McClure)为竹亚科(Subfam. Bambusoideae)箬竹属(*Indocalamus* Nakai)多年生常绿灌木,地下茎复轴型,繁殖能力强,叶长而宽大,在观赏园艺和水土保持等方面具有较高的应用价值。近年来,髯毛箬竹的抗寒能力也开始受到人们的关注和重视^[16]。

作者以髯毛箬竹盆栽苗为实验材料,采用叶面喷施的方法探讨纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片光合特征参数(包括净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间CO₂浓度、气孔限制值和水分利用效率)日变化的影响,以期对纳米SiO₂对植物光合特征的调节作用研究提供基础实验数据,同时也为纳米材料在林业生产中的

应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试的髯毛箬竹由南京林业大学竹类研究所提供。于2007年12月选取株高、长势相似的竹苗剪去地上部分,置于竹类研究所温室内盆栽,盆口直径为28 cm、高为33 cm,下置浅壁托盘。采用常规栽培管理方法进行日常管理。

实验用纳米SiO₂由南京海泰纳米材料有限公司提供,颗粒平均直径20 nm,含量大于99.5%。使用的纳米SiO₂处理液均用蒸馏水配制,且均为现配现用。为防止纳米SiO₂在溶液中团聚,纳米SiO₂处理液配制后立即置于超声振荡器中振荡15 min。

1.2 方法

1.2.1 纳米SiO₂的处理方法 2008年9月底选取长势良好且生长状况较为一致的髯毛箬竹盆栽苗进行实验。

分别用质量浓度150、300和450 mg·L⁻¹的纳米SiO₂处理液100 mL喷施竹叶,对照(CK)则喷施蒸馏水100 mL,每处理5盆(每盆约10株),每盆视为1次重复。选取不同植株当年生由上往下第3分枝上长势良好、生长及生理状态较为一致的成熟叶片进行定位标记(标记叶通过叶绿素计预测定选取),用于光合气体交换参数的跟踪定位测定,每盆选取2片叶。

1.2.2 光合特征参数的测定方法 于2008年10月29日(晴朗天气)使用LI-6400R便携式光合测定仪(美国LI-COR公司)及配套的6400-02B红蓝光源对标记的叶片进行测定,叶室面积2 cm×3 cm。从7:00至16:00每隔1 h测定1次;参照外界的实际光照强度设定测定时的光照强度。采用开放式气体通路,空气流速500 mL·min⁻¹。测量的光合特征参数主要包括:净光合速率(Pn)、气孔导度(Cs)、蒸腾速率(Tr)、胞间CO₂浓度(Ci)、气孔限制值(Ls)和水分利用效率(WUE)。各指标均重复测定2次,结果取平均值。

1.3 统计分析

实验数据采用 Excel 软件进行整理并绘图, 使用 SPSS 13.0 统计分析软件中的 One-Way ANOVA 法进行方差分析和 Duncan's 多重比较分析。

2 结果和分析

2.1 纳米 SiO₂对髯毛箬竹叶片净光合速率(Pn)日变化的影响

喷施不同质量浓度纳米 SiO₂后髯毛箬竹叶片净光合速率的日变化曲线见图 1。对照组(0 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂)的髯毛箬竹叶片净光合速率的日变化曲线呈典型的“双峰”型, 峰值分别出现在 10:00 和 13:00, 且首峰值明显大于次峰值; 12:00 出现明显的“午休”现象。与对照组相比, 用不同质量浓度(150、300 和 450 mg · L⁻¹) 纳米 SiO₂ 喷施处理后, 髯毛箬竹叶片光合作用的“午休”现象均得到不同程度的缓解, 叶片净光合速率的日变化曲线由典型的“双峰”型变成了不明显的“双峰”型直至“单峰”型。在测定时间范围(7:00 至 16:00)内, 纳米 SiO₂ 可使髯毛箬竹的净光合速率提高, 其中, 300 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组光合速率的增幅最大, 在 10:00 和 12:00 髯毛箬竹叶片的净光合速率分别比对照提高了 13.98% 和 51.47%。差异显著性分析结果表明: 300 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组髯毛箬竹叶片的净光合速率与对照组间差异显著(P < 0.05)。

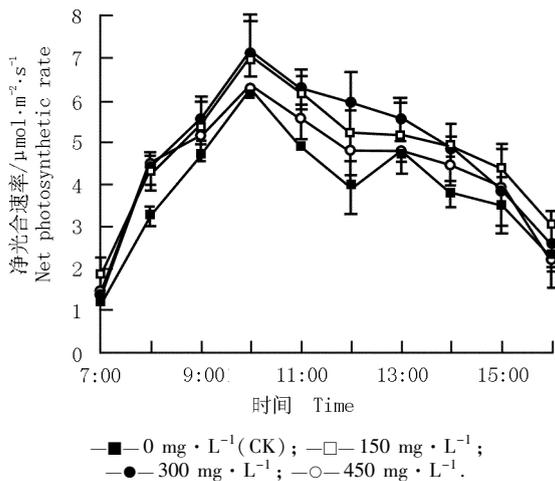


图 1 不同质量浓度纳米 SiO₂对髯毛箬竹叶片净光合速率日变化的影响

Fig. 1 Effect of nano-SiO₂ with different concentrations on daily change of net photosynthetic rate of *Indocalamus barbatus* McClure leaves

2.2 纳米 SiO₂对髯毛箬竹叶片气孔导度(Cs)日变化的影响

喷施不同质量浓度纳米 SiO₂后髯毛箬竹叶片气孔导度的日变化曲线见图 2。从图 2 可以看出: 对照组髯毛箬竹叶片气孔导度的日变化曲线呈不明显的“双峰”型, 从 7:00 开始气孔导度不断上升, 在 10:00 左右出现首峰, 到 11:00 时气孔导度出现较为明显的下降, 以后又小幅回升, 并在 13:00 左右达到次峰, 此后随光照强度的减弱, 叶片气孔导度逐渐回落。与对照组相比, 450 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组叶片气孔导度的变化较小, 150 和 300 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组髯毛箬竹叶片的气孔导度均明显增大, 气孔导度的日变化曲线由对照组的不明显“双峰”型均变成了“单峰”型。尤其是在 8:00 至 13:00 这一时段内, 各处理组的叶片气孔导度均较对照明显提高, 在 10:00 时 150、300 和 450 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组叶片气孔导度分别比对照提高了 61.25%、71.21% 和 35.06%。差异显著性分析结果表明: 10:00 时, 各处理组间髯毛箬竹叶片气孔导度差异显著(P < 0.05), 且以 300 mg · L⁻¹ 纳米 SiO₂ 处理组气孔导度最高。

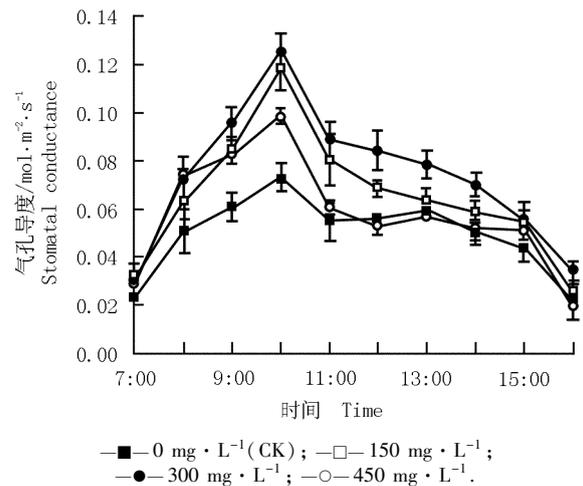


图 2 不同质量浓度纳米 SiO₂对髯毛箬竹叶片气孔导度日变化的影响

Fig. 2 Effect of nano-SiO₂ with different concentrations on daily change of stomatal conductance of *Indocalamus barbatus* McClure leaves

2.3 纳米 SiO₂对髯毛箬竹叶片蒸腾速率(Tr)日变化的影响

蒸腾速率是植物水分代谢的重要指标之一, 与净光合速率有着紧密的联系。喷施不同质量浓度纳米 SiO₂后髯毛箬竹叶片蒸腾速率(Tr)的日变化曲线见

图3。对照组髯毛箬竹叶片蒸腾速率的日变化曲线为明显的“双峰”型,峰值分别出现在10:00和13:00,但首峰值略小于次峰值;11:00左右出现明显的“午休”现象;13:00之后蒸腾速率快速下降。与对照相比,虽然纳米SiO₂各处理组的叶片蒸腾速率日变化也表现为相似的“双峰”型,但总体上看,喷施不同质量浓度纳米SiO₂可不同程度提高髯毛箬竹叶片的蒸腾速率,并缓解了“午休”现象,其中以300 mg·L⁻¹纳米SiO₂的效果最佳;喷施300 mg·L⁻¹纳米SiO₂后髯毛箬竹叶片在10:00、11:00和13:00时的蒸腾速率分别比对照提高了49.09%、44.21%和33.63%,且与对照组间的差异均达显著水平($P < 0.05$)。

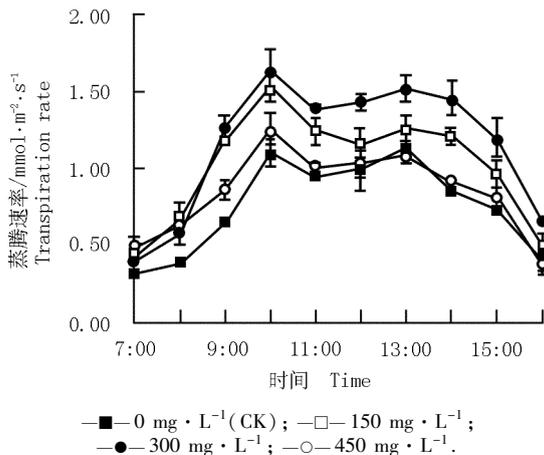


图3 不同质量浓度纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片蒸腾速率日变化的影响

Fig. 3 Effect of nano-SiO₂ with different concentrations on daily change of transpiration rate of *Indocalamus barbatus* McClure leaves

2.4 纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片胞间CO₂浓度(C_i)日变化的影响

喷施不同质量浓度纳米SiO₂后髯毛箬竹叶片胞间CO₂浓度(C_i)的日变化曲线见图4。对照组的髯毛箬竹叶片胞间CO₂浓度的日变化曲线总体上呈“W”型,从7:00到10:00叶片胞间CO₂浓度不断下降,在10:00左右达到这一时段的最小值;10:00之后出现小幅回升,并在12:00出现小峰值,13:00时达到这一时段的最小值,之后又略有上升。与对照相比,喷施不同质量浓度纳米SiO₂能够不同程度地缩小7:00到10:00这一时段内髯毛箬竹叶片胞间CO₂浓度的降幅以及“午休”(12:00)时段内胞间CO₂浓度的上升幅度。其中,喷施300 mg·L⁻¹纳米SiO₂的

髯毛箬竹叶片在10:00和12:00时的胞间CO₂浓度分别比对照提高了25.85% ($P < 0.05$)和降低了4.92%。

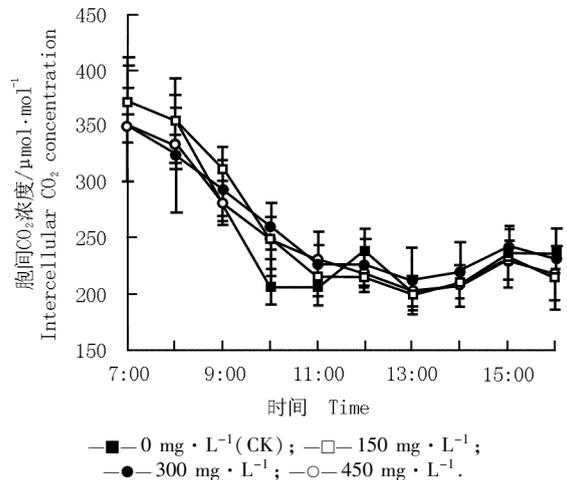


图4 不同质量浓度纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片胞间CO₂浓度日变化的影响

Fig. 4 Effect of nano-SiO₂ with different concentrations on daily change of intercellular CO₂ concentration of *Indocalamus barbatus* McClure leaves

2.5 纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片气孔限制值(L_s)日变化的影响

喷施不同质量浓度纳米SiO₂后髯毛箬竹叶片气孔限制值(L_s)的日变化曲线见图5。对照组髯毛箬竹叶片气孔限制值的日变化曲线总体上呈现“双峰”型,与胞间CO₂浓度的日变化趋势基本相反;从7:00到10:00叶片的气孔限制值不断升高,在10:00左右

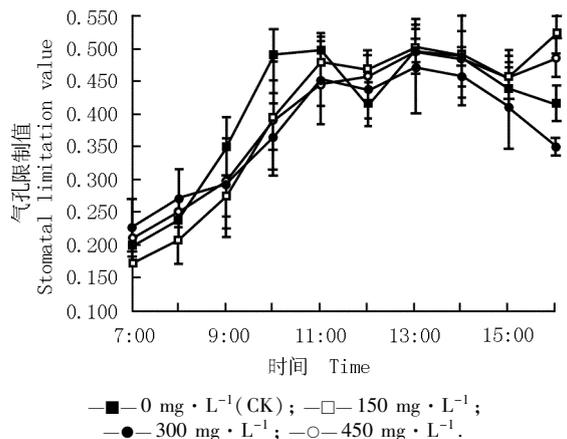


图5 不同质量浓度纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片气孔限制值日变化的影响

Fig. 5 Effect of nano-SiO₂ with different concentrations on daily change of stomatal limitation value of *Indocalamus barbatus* McClure leaves

达到峰值;此后开始下降,并在12:00左右达到谷值;13:00时又再次升高并出现峰值;此后逐步降低。与对照相比,喷施150、300和450 mg·L⁻¹纳米SiO₂可不同程度地缩小7:00到10:00这一时段内髯毛箬竹叶片气孔限制值的上升幅度以及11:00至12:00叶片气孔限制值的下降幅度。喷施300 mg·L⁻¹纳米SiO₂后,髯毛箬竹叶片在10:00和12:00的气孔限制值分别比对照组降低了34.01% ($P<0.05$)和提高了5.96%;而与对照相比,在16:00时,喷施了150和450 mg·L⁻¹纳米SiO₂的处理组叶片的气孔限制值增大,但300 mg·L⁻¹纳米SiO₂处理组叶片的气孔限制值减小。

2.6 纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片水分利用效率(WUE)日变化的影响

水分利用效率在数值上与净光合速率和蒸腾速率的比值相等,能够反映出植物消耗单位质量水分所固定的CO₂量,体现出植物对水分的利用水平。喷施不同质量浓度纳米SiO₂后髯毛箬竹叶片水分利用效率的日变化曲线见图6。对照组髯毛箬竹叶片水分利用效率的日变化曲线总体上呈现为不明显的“U”型;从7:00开始水分利用效率不断下降,直至12:00左右达到谷底值,此后又缓慢上升,但上升幅度不大。在7:00至10:00这一时段内,纳米SiO₂各处理组髯毛箬竹叶片的水分利用效率始终低于对照,在8:00时150 mg·L⁻¹纳米SiO₂处理组的水分利用效率比对照低18.20% ($P<0.05$);在10:00时300 mg·L⁻¹纳米SiO₂处理组叶片水分利用效率比对照低25.17%

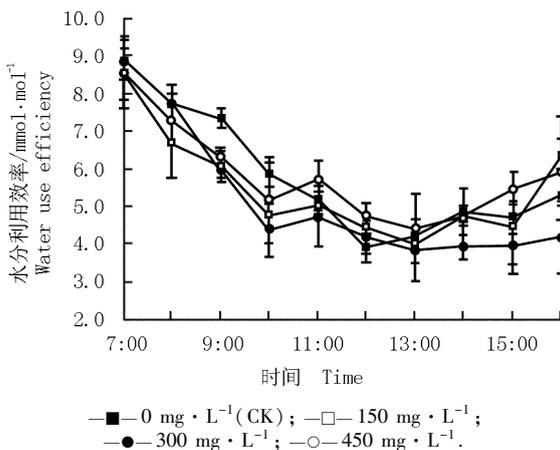


图6 不同质量浓度纳米SiO₂对髯毛箬竹叶片水分利用效率日变化的影响

Fig. 6 Effect of nano-SiO₂ with different concentrations on daily change of water use efficiency of *Indocalamus barbatus* McClure leaves

($P<0.05$);在11:00时纳米SiO₂各处理组叶片的水分利用效率均不同程度增加;至12:00时,150、300和450 mg·L⁻¹纳米SiO₂处理组叶片的水分利用效率分别比对照组提高了13.99%、7.63%和21.62%。

3 结论和讨论

叶片光合作用的日变化过程能够反映出植物全天进行物质积累与生理代谢的持续能力,同时也是分析环境因素影响植物生长和生理代谢的重要指标之一^[17-18]。研究结果表明:对照组(0 mg·L⁻¹纳米SiO₂)髯毛箬竹叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和气孔限制值的日变化曲线均为“双峰”型,有明显的“午休”现象;而喷施150、300和450 mg·L⁻¹纳米SiO₂后髯毛箬竹叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均有不同程度的提高,气孔限制值则有不同程度的下降,4个指标日变化曲线的峰型也变成了不明显的“双峰”型直至“单峰”型。结果显示,纳米SiO₂可在一定程度上缓解髯毛箬竹叶片光合作用的“午休”现象,并表现出一定的浓度效应,其中以300 mg·L⁻¹纳米SiO₂的效果最佳。

影响叶片光合速率的限制因素主要有气孔因素和非气孔因素2种。气孔因素即气孔的关闭导致气孔限制值增大,进而引起CO₂供应不足;非气孔限制因素即叶肉细胞光合活性降低引起同化力不足进而限制了光合作用^[19]。根据Farquhar等的观点和常用的光合速率分析方法^[19-20],当净光合速率和气孔导度下降而胞间CO₂浓度上升时,非气孔因素是光合能力下降的主要原因;而当净光合速率、气孔导度和胞间CO₂浓度均下降时,气孔因素就成为光合能力的主要限制因素。本研究中,从10:00至12:00,对照组髯毛箬竹叶片的净光合速率和气孔导度总体上下降,而胞间CO₂浓度则有所上升,说明髯毛箬竹叶片净光合速率的降低主要是由非气孔限制因素所引起的,即髯毛箬竹叶片光合作用的“午休”现象主要是由叶肉细胞光合活性降低引起的,推测髯毛箬竹叶片净光合速率的降低可能与光能的传递、转化以及CO₂的同化效率受到抑制有关。而喷施不同质量浓度纳米SiO₂后,髯毛箬竹叶片的净光合速率显著提高,很大程度上缓解了光合作用的“午休”现象。Gao等^[21]的研究结果表明:纳米TiO₂处理能促进菠菜Rubisco酶和Rubisco活化酶的活性,并诱导Rubisco酶-Rubisco

活化酶复合体的形成,推测适当浓度的纳米 SiO₂ 可能通过增强 Rubisco 酶的活性来提高 CO₂ 的同化效率。

此外,“午休”时纳米 SiO₂ 各处理组髯毛箬竹叶片的水分利用效率均有所提高,也间接反映了纳米 SiO₂ 对非气孔限制因素的改善作用。从 8:00 至 10:00,对照组髯毛箬竹叶片的净光合速率和气孔导度均上升,而胞间 CO₂ 浓度下降,同时气孔限制值不断提高;而喷施不同质量浓度纳米 SiO₂ 后,髯毛箬竹叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及胞间 CO₂ 浓度都有显著提高,说明髯毛箬竹叶片最大光合能力的提高主要受气孔因素调节。气孔导度的增加使外界 CO₂ 更多地进入胞间,为光合作用过程中的碳同化提供更多的原料,从而在一定程度上促使髯毛箬竹叶片的光合能力达到最大。尽管气孔导度增加引起的蒸腾速率增强致使水分利用效率降低,但蒸腾速率的提高有利于促进根系对水分和矿质营养的吸收,可能间接地促进最大光合能力的出现。

综合上述分析认为:髯毛箬竹叶片光合能力的提高是由气孔和非气孔限制因素共同作用的结果;适当喷施纳米 SiO₂ 可以有效提高髯毛箬竹的净光合能力,其对髯毛箬竹叶片光合作用“午休”现象的缓解主要是改善了非气孔限制因素,即通过提高髯毛箬竹叶肉细胞的光合活性进而提高净光合能力;另一方面,髯毛箬竹叶片最大光合能力的提高主要由气孔因素来调节。尽管纳米 SiO₂ 对植物光合作用的调节效应与纳米 TiO₂ 可能有相似之处^[12,15,21],但其具体的调节机制尚不清楚,有待深入研究。

参考文献:

- [1] Gleiter H. Nanostructured materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1997, 33(2): 30-38.
- [2] 游春苹,吴正钧,王荫榆,等. 纳米材料在电化学生物传感器中的应用进展[J]. *化学传感器*, 2009, 29(3): 1-7.
- [3] 肖强,孙焱鑫,王甲辰,等. 纳米材料在土壤与植物营养领域的应用进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(4): 10-15.
- [4] Cho M, Chung H, Choi W, et al. Linear correlation between inactivation disinfection of *E. coli* and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfection[J]. *Water Research*, 2004, 38(4): 1069-1077.
- [5] 张萍,崔海信,宋娜,等. 纳米 TiO₂ 光半导体材料防治植物病害的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 13-16.
- [6] 郭莉,王丹军,王晓润,等. 纳米 TiO₂ 对豌豆萌发及生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(18): 5352-5353, 5355.
- [7] 杨君丽,董汇泽,鲁云. 纳米 TiO₂ 光催化剂对大黄种子活力的影响[J]. *中国种业*, 2009(3): 45-46.
- [8] Yang F, Hong F S, You W, et al. Influences of nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing spinach[J]. *Biological Trace Element Research*, 2006, 110(2): 179-190.
- [9] 涂庆华,李娘辉,李玲,等. 纳米化的二氧化钛促进绿豆下胚轴不定根形成[J]. *植物生理学通讯*, 2005, 41(3): 313-315.
- [10] 李大力,李丹,汪信. 无机纳米粒子对人类细胞培养及植物组培苗影响的研究[J]. *徐州师范大学学报:自然科学版*, 2002, 20(2): 51-53.
- [11] Hong F S, Zhou J, Liu C, et al. Effect of nano-TiO₂ on photochemical reaction of chloroplasts of spinach[J]. *Biological Trace Element Research*, 2005, 105(1/3): 269-279.
- [12] Su M Y, Hong F S, Liu C, et al. Effects of nano-anatase TiO₂ on absorption, distribution of light, and photoreduction activities of chloroplast membrane of spinach[J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 118(2): 120-130.
- [13] Su M Y, Wu X, Liu C, et al. Promotion of energy transfer and oxygen evolution in spinach photosystem II by nano-anatase TiO₂ [J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 119(2): 183-192.
- [14] 王震宇,于晓莉,高冬梅,等. 人工合成纳米 TiO₂ 和 MWCNTs 对玉米生长及其抗氧化系统的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 480-487.
- [15] Hong F S, Yang P, Gao F Q, et al. Effect of nano-anatase TiO₂ on spectral characterization of photosystem II particles from spinach[J]. *Chemical Research in Chinese University*, 2005, 21(2): 196-200.
- [16] 田海涛,高培军,温国胜. 7 种箬竹抗寒特性比较[J]. *浙江林业学院学报*, 2006, 23(6): 641-646.
- [17] Cui X Y, Song J F, Zhang Y H. Some photosynthetic characteristics of *Fraxinus mandshurica* seedlings grown under different soil water potentials[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(6): 794-802.
- [18] 刘志龙,方建民,虞木奎,等. 三种林-茶复合林分中环境因子和茶的光合特征参数的日变化规律[J]. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(2): 62-67.
- [19] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [20] Zhang Z J, Shi L, Zhang J Z, et al. Photosynthesis and growth responses of *Parthenocissis quinquefolia* (L.) Planch to soil water availability[J]. *Photosynthetica*, 2004, 42(1): 87-92.
- [21] Gao F Q, Liu C, Qu C X, et al. Was improvement of spinach growth by nano-TiO₂ treatment related to the changes of rubisco activase[J]. *Biometals*, 2008, 21(2): 211-217.

(责任编辑:佟金凤)