





合大雷  
质(体  
余 AM  
为 201  
率分别

日对  
十面积  
ic.  
特代

的根际  
后待用<sup>[30]</sup>  
其它微生物一  
&2013 年  
!70.00

几  
12 年  
×40 cm  
苗移栽到花

共 4 个处理: 模拟增温  
。增温处理采用红外线辐  
(A), 调整加热管高度使植株顶

升土壤 28.3 个孢子) 接种 AMF

不接

物一

年

00

控制光合有效

曲线模型拟合双曲线

同时用方差

具了放

版个上

继上

暗呼吸速率( $N_d$ )。

$CO_2$  响应曲线的测定采用 LED 光源将光强控制在  $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (接近叶片饱和光强),以小钢瓶内液态  $CO_2$  为气源,控制  $CO_2$  浓度梯度依次为 1500!1200!1000!800!600!400!200!150!120!100!80  $\mu\text{mol/mol}$ 。  $CO_2$  响应曲线模型用直角双曲线修正模型<sup>[33]</sup>,同时用光合 4.1.1 软件对  $CO_2$  响应曲线拟合,得到初始羧化效率( $\alpha$ )、光合能力( $J_{\text{max}}$ )、饱和胞间  $CO_2$  浓度( $\Gamma_{\text{isat}}$ )、 $CO_2$  补偿点和光呼吸速率( $N_p$ )。

#### 2.M.M 抗氧化酶与膜脂过氧化程度的测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法,以抑制 NBT 光化还原 50% 的酶量为 1 个酶活力单位<sup>[34]</sup>。过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的测定采取愈创木酚法,分别以每分钟  $J_{470}$  增加 0.01 和每分钟  $J_{240}$  减少 0.01 为 1 个酶活力单位<sup>[34]</sup>。丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法<sup>[34]</sup>。

#### 2.M.6 营养物质及叶绿素相对含量的测定

叶可溶性糖的测定采取蒽酮比色法<sup>[35]</sup>。叶可溶性蛋白的测定



14:00左右出现第2个峰值,12:00存在明显的光合午休现象" AMF + SW 处理的  $A_n$  在 14:00 和 16:00 显著高于 CK 而在 18:00 显著低于 CK" 模拟增温处理条件下的  $W_s$  在大多数观察时间高于非增温处理" AMF + SW 处理组的叶片  $W_s$  变化规律与  $A_n$  一致,也呈现出“双峰”。叶片  $O_r$  的变化呈现“单峰”曲线,而 SW 处理在 12:00 具有较高的  $W_s$ ,这与正午较高的  $O_r$  相一致"

对各参数日均值的比较也发现(表 4): AMF + SW 的日均  $A_n$ 、 $W_s$  和  $O_r$







表 U 模拟增温条件下接种丛枝菌根真菌对夏蜡梅幼苗叶片保护酶活性和膜脂过氧化程度的影响

<-: \* U VEE' ("8 )E -B: @8(@\* -B ?A()BB! ,=-\* E@. +, ,.) (@\*-), ). "!' #B)" ("), . ' . =A?' -(,H,"A - . C ?'?: B-. ' \*,C #B)9,C' 'H'\*)E '' -H'8 )E  
*Sinocalycanthus chinensis* 8' C\*, . +8 @. C' B 8, ?@\* -" C %-B?, , +

处理 Treatment	超氧化物歧化酶 SOD /( U/g 鲜重)	过氧化物酶 POD /( 100 U g <sup>-1</sup> 鲜重 min <sup>-1</sup> )	过氧化氢酶 CAT /( 100 U g <sup>-1</sup> 鲜重 min <sup>-1</sup> )	丙二醛 MDA /( μmol/μg 鲜重)
AMF + SW	0.21 ± 0.002a	27.92 ± 2.15a	6.17 ± 0.41a	14.02 ± 1.76a
AMF	0.21 ± 0.01a	31.10 ± 4.96a	4.63 ± 0.36a	14.12 ± 2.21a
SW	0.21 ± 0.003a	28.94 ± 2.17a	4.80 ± 0.54a	14.37 ± 1.40a
CK	0.21 ± 0.01a	31.10 ± 5.56a	6.50 ± 0.98a	10.54 ± 0.55a
O				
AMF	0.074	0.104	0.061	0.036
SW	0.051	0.252	0.132	3.047
AMF × SW	0.118	0.024	3.093	0.824

数据为平均值 ± 标准误 , 同列数据不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ( 4 < 0.05); \* 表示 4 < 0.05; \*\* 表示 4 < 0.01

表 5 模拟增温条件下接种丛枝菌根真菌对夏蜡梅幼苗叶片营养物质积累和叶绿素相对含量的影响

<-: \* 5 VEE' ("8 )E -B: @8(@\* -B ?A()BB! ,=-\* E@. +, ,.) (@\*-), ). "!' . @B, ' . " -((@?@\*-), . - . C (!\*)B)#!A\*\* B' \*-,"H' () . " . " )E '' -H'8 )E  
*Sinocalycanthus chinensis* 8' C\*, . +8 @. C' B 8, ?@\* -" C %-B?, , +

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar / ( mg/g 干重)	可溶性蛋白 Soluble protein / ( mg/g 鲜重)	叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content
AMF + SW	22.92 ± 4.11b	12.04 ± 0.40a	14.15 ± 1.43a
AMF	41.65 ± 2.86a	8.45 ± 0.63b	14.88 ± 1.74a
SW	30.63 ± 1.38b	8.21 ± 0.76bc	17.27 ± 1.56a
CK	31.33 ± 2.17b	6.47 ± 0.65c	14.88 ± 1.28a
O			
AMF	0.020	12.582 **	1.025
SW	8.847 *	13.638 **	0.291
AMF × SW	6.541 *	1.100	1.034

数据为平均值 ± 标准误 , 同列数据不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ( 4 < 0.05); \* 表示 4 < 0.05; \*\* 表示 4 < 0.01

分之一 因此 AMF 能进入夏蜡梅根系无法抵达的细小土壤孔隙吸收水分和养分" 此外 , 气候变暖还会通过土壤温度对 AMF 的影响作用于共生植物" 土壤温度升高会提高 AMF 的拓殖率和菌丝长度 , 从而促进共生植物养分吸收和生长<sup>[37-38]</sup> 其中 AMF 对于共生植物 P 元素的吸收贡献最大" 菌丝能分泌有机酸 , 磷酸酶 , 活化土壤中难溶性 P 进而通过无隔菌丝供给宿主植物<sup>[12-13]</sup>" 在植物光合作用中 , 元素 P 是光反应阶段的辅酶 , 暗反应阶段固定 CO<sub>2</sub> 的 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶 Rubisco , 以及能量物质 ATP 的重要组成元素" 因此 , AMF 促进夏蜡梅光合作用的原因之一可能是 AMF 对土壤中有限 P 元素吸收的增加" 夏蜡梅对养分和水分吸收的增加将有利于光合作用和有机物积累" 本研究表明接种 AMF 显著提高了夏蜡梅最大净光合速率 4<sub>max</sub> 和光合能力 J<sub>max</sub> , 其它研究也有类似的结果<sup>[14-15]</sup>" 接种 AMF 还会影响气孔行为 , 缩短气孔关闭时间<sup>[36, 39-40]</sup>" 在光合日进程中 , 夏蜡梅 4<sub>n</sub> 与 W<sub>s</sub> 呈现出一致的变化趋势 , 相关性分析也表明夏蜡梅幼苗日均 4<sub>n</sub> 与 W<sub>s</sub> 和 O<sub>r</sub> 呈显著的正相关 , 说明夏蜡梅光合作用主要以气孔限制为主" 添加 AMF 还提高了夏蜡梅幼苗叶片 LSP , 说明接种 AMF

白,而模拟增温条件下添加 AMF 却对可溶性蛋白没有影响" 说明 AMF 和模拟增温对可溶性蛋白的积累具有相反的作用"

模拟增温条件下接种 AMF 提高了夏蜡梅幼苗叶片的日均  $4_n$  和  $4_{nmax}$ ,但是对生物量的积累没有显著影响" 模拟增温条件下对玉米接种 AMF 幼套球囊霉( W)1@\*2 .3\*/9,3\*@) 后也发现,不管增温与否,接种 AMF 对玉米生物量没有显著影响<sup>[39]</sup>" 原因可能有 3 个方面,首先,接种 AMF 提高夏蜡梅幼苗  $4_n$  的同时也提高了叶片的  $N_d$  和  $N_p$ ,因此对生物量的积累没有表现出显著的影响;其次,AMF 与植物共生过程中,植物光合产物中约有 20% 供给共生的 AMF,而温度升高可以通过提高菌根呼吸速率来加强养分从植物向 AMF 的流动,从而减少植物的有机物积累<sup>[22,39,41]</sup>" 因此,模拟增温条件下接种 AMF 虽然会提高夏蜡梅  $4_n$ ,但是可能同时也提高了对有机物的消耗,其最终生物量的积累取决于两者之差;此外,实验处理时间短也可能是一个原因,虽然从实验处理到指标测定有 8 个多月,但是夏蜡梅为落叶植物,夏蜡梅有叶期仅有 4&5 个月,因此可能导致实验处理的效果未达到显著"

尽管模拟增温和 AMF 对夏蜡梅幼苗生物量积累没有显著影响,但是对根系形态与生物量分配具有显著影响" 研究发现,接种 AMF 对夏蜡梅根长度!根表面积!根体积及根尖数均具有显著的负效应,而对根平均直径则表现出显著的正效应" AMF 不同水分条件下接种 AMF 对显著降低了湿地植物 I'C./2 (61/C12, 的根系长度与根系表面积<sup>[42]</sup>" 而接种 AMF 对植物 M5376\* @ 2,) '9,6', 和 4, /'9\* @ 7. @'31@1/ 的根系长度则具有正效应<sup>[43]</sup>,但是另外的研究则发现接种 AMF 对 MD 2,) '9,6', 的根长和根表面积没有影响<sup>[42]</sup>" 因此,AMF 对共生植物根系形态和生物量分配的影响与植物物种! AMF 物种及实验条件有关" AMF 对夏蜡梅根系结构的影响与 AMF 的功能密不可分,AMF 能使共生植物低成本高效率的吸收养分,从而使共生植物对根系系统生长的投入比未接种植株减少<sup>[44-45]</sup>,因此,接种 AMF 有使夏蜡梅幼苗根系变短变粗的趋势" 但是,AMF + SW 与 SW 的根系形态不存在显著差异" 说明模拟增温条件下添加 AMF 不会影响夏蜡梅根系,或者模拟增温会减弱 AMF 对夏蜡梅根系形态的影响" 这与模拟增温与 AMF 对夏蜡梅根系的显著的交互作用一致"

参考文献( G'E'B'. ('8) :

- [ 1 ] Thomas C D , Cameron A , Green R E , Bakkenes M , Beaumont L J , Collingham Y C , Erasmus B F N , de Siqueira M F , Grainger A , Hannah L , Hughes L , Huntley B , van Jaarsveld A S , Midgley G F , Miles L , Ortega-Huerta M A , Peterson A T , Phillips O L , Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature* ,2004 ,427( 6970) : 145-148.
- [ 2 ] Araújo M B , Rahbek C. How does climate change affect biodiversity?. *Science* ,2006 ,313( 5792) : 1396-1397.
- [ 3 ] Hellmann J J , Byers J E , Bierwagen B G , Dukes J S. Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology* ,2008 ,22( 3) : 534-543.
- [ 4 ] Parmesan C , Burrows M T , Duarte C M , Poloczanska E S , Richardson A J , Schoeman D S , Singer M C. Beyond climate change attribution in conservation and ecological research. *Ecology Letters* ,2013 ,16( S1) : 58-71.
- [ 5 ] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis // Contribution of the Fourth Assessment Report of Working Group. Cambridge: Cambridge University Press ,2007.
- [ 6 ] Wu Z , Dijkstra P , Koch G W , Peñuelas J , Hungate B A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology* ,2011 ,17( 2) : 927-942.
- [ 7 ] Niu S L , Luo Y Q , Li D J , Cao S H , Xia J Y , Li J W , Smith M D. Plant growth and mortality under climatic extremes: an overview. *Environmental and Experimental Botany* ,2014 ,98: 13-19.
- [ 8 ] Fu G , Shen Z X , Sun W , Zhong Z M , Zhang X Z , Zhou Y T. A meta-analysis of the effects of experimental warming on plant physiology and growth on the Tibetan plateau. *Journal NH14uNwaCpTwjNI.BBBB5NIIBVo.BuN414go5N.NGgluB515lw:o51414.BBl.Iou54ulwaCHTtwjNIhoNIIBVo.BuooCeTtwjNI.l4uNw*

0  
o  
M  
2  
la  
J  
of  
J  
ic  
o  
C  
z  
E  
官

0  
y  
J

runs M.  
: 1437-  
gy of pl  
fects on  
atal cor  
CO<sub>2</sub>响  
术. 北  
实验指  
京: 华  
d C F  
os

interactions  
ect soil carb  
ions: soil m  
robi  
izae and r

al fungi. Critical Reviews in  
?,:29\*@  
,2011 ,8(9):  
ays for warming ecosystem field plots. Global

0  
11]

al fung  
of water avai  
oulois H ,Declerck  
tion in newly establish

136

111

94