

不同铵硝配比对低温胁迫下棉花幼苗光合及叶绿素荧光参数的影响

张淑英¹, 褚贵新¹, 梁永超^{1,2}

(石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000; 2 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:为探讨增铵营养提高新疆棉花抗逆能力的内在机制,以新陆早13号为供试棉种,通过在人工气候室内模拟低温逆境,研究不同氮素形态对低温胁迫下棉花幼苗叶绿素含量及部分光合特性的影响。结果表明:两种温度培养下,铵硝混合营养处理的棉苗叶绿素含量均高于纯铵处理,并显著高于纯硝处理($P<0.05$)。低温逆境(15℃)处理,棉花叶绿素含量显著低于正常(25℃)处理($P<0.05$)。15℃逆境处理导致棉花幼苗净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、电子传递速率(ETR)、光化学量子产量($Yield$)、光化学猝灭系数(qP)及非光化学猝灭系数(qN)表现出下降趋势,且差异显著($P<0.05$)。25℃条件下,棉花幼苗 P_n 、 G_s 、 T_r 随着铵比例增加显著增大($P<0.05$),在纯铵营养下达到最大。而在15℃下,棉花幼苗 ETR 、 $Yield$ 、 qP 及 qN 随着铵浓度增加呈现出先增大后减小的趋势。结论:低温胁迫下,增铵营养提高了棉花幼苗叶绿素含量,促进了棉苗生长,维持代谢平衡,同时通过提高 P_n 、 G_s 、 T_r 等光合参数及 ETR 、 $Yield$ 、 qP 、 qN 等叶绿素荧光参数,减轻了低温胁迫对棉花光合系统的伤害,增强棉花幼苗的抗冷性。

关键词:棉花幼苗;铵硝配比;低温胁迫;光合特性

中图分类号:S158.3 **文献标志码:**A

Effects of different NH_4^+/NO_3^- on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in the cotton seedlings under low temperature stress

ZHANG Shu-ying¹, CHU Gui-xin¹, LIANG Yong-chao^{1,2}

(1 College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The internal mechanism of enhanced effect by ammonium (NH_4^+) on cotton increasing the stress tolerance of Xinjiang's cotton was investigated to better understand how to improve the cold resistance of cotton seedling. Effects of various form nitrogen on low temperature stress of Cotton-Xinluzao13 and its photosynthetic characteristics were explored by the method of manually simulate the environment under low temperature in the artificial climate chamber. The results indicated that the chlorophyll concentration of mixed nitrogen nutrition was higher than both NH_4^+/NO_3^- as 100/0 and NH_4^+/NO_3^- as 0/100 especially the NH_4^+/NO_3^- as 0/100 ($P<0.05$) under two culturing temperature gradients. Chlorophyll concentration of cotton seedlings was lower significantly ($P<0.05$) under low temperature (15℃) than that under normal temperature (25℃). The P_n , G_s , T_r , ETR , $Yield$, qP and qN of cotton seedlings also decreased significantly ($P<0.05$) under low temperature. The P_n , G_s , T_r of cotton seedlings increased significantly ($P<0.05$) or extreme significantly ($P<0.01$) with ammonium (NH_4^+) ratio increasement and reached the maximum in NH_4^+/NO_3^- as 100/0 under normal temperature. The ETR , $Yield$, qP and qN of cotton seedlings increased first and then decreased under low temperature. Enhancing the ammonium (NH_4^+) promoted the chlorophyll concentration, the photosynthetic indexes of P_n , G_s , T_r and fluorescence parameters of ETR , $Yield$, qP , qN of cotton seedlings, kept the balance of metabolism and relieved the harm of low temperature stress and strengthens the cold resistance of cotton seedling.

Keywords: cotton seedling; $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$; low temperature stress; photosynthetic characteristics

NH_4^+-N 和 NO_3^--N 是作物能够吸收利用的两种主要氮素形态,作物对 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 配合施用的生长效果优于任一氮源单施效果,其最佳比例因不同作物种类而异^[1]。前人研究表明,作物吸收、同化铵态氮所消耗的能量低于硝态氮^[2],因此,理论上增铵营养可作为提高氮素养分高效利用、促进作物生长发育及提高产量的有效手段。

低温是影响植物生长的全球性自然灾害。低温胁迫抑制作物生长发育,降低光合作用^[3],进而影响矿物质的吸收和养分的运转,使根、茎、叶代谢过程受到阻碍,导致作物生长发育缓慢,生育期延迟。

棉花起源于热带、亚热带,是典型的喜温作物,对低温胁迫反应敏感。已有研究表明,不同氮素形态显著影响作物生长^[4]、关键酶活性^[5]、光合特性^[6]、品质及产量^[7]等。Papadopoulos^[8]研究了控温条件下,铵、硝营养对草莓的影响,结果证明在低温条件下,相比硝营养,草莓更偏好铵营养。Schittenhelm 等^[9]研究发现,混合铵硝营养条件下大麦产量比纯硝营养高 20%。说明同时供给植物 NH_4^+ 和 NO_3^- 可以发挥相互协助的增效作用,促进作物的生长,对生长的促进效果高于单独的铵营养或硝营养。不同氮素形态对低温胁迫下禾谷类作物和蔬菜生理生化影响的研究较多^[1,4,5,7-9],棉花是受低温影响敏感的经济作物,目前不同氮素形态对低温胁迫下棉花幼苗光合、生长发育研究较少。

新疆是我国最大的优质商品棉生产基地^[10]。北疆棉区在 4、5 月的温度较低,低温冷害和倒春寒始终是威胁棉花生育前期生长的主要限制因子,对棉花产量和品质的影响极大。本试验针对新疆(尤其是北疆地区)棉花生产实践中存在的早春低温胁迫问题,从植物生长最重要的氮源入手,研究不同氮素形态对低温胁迫下棉花幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响,揭示增铵营养对提高棉花抗寒性作用,为制定北疆棉花抵抗低温冷害的防御技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试棉花(*Gossypium hirsutum* L)品种为新陆早 13 号。种子经消毒后在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的培养箱内催芽,将发芽一致的种子播种于装有蛭石的营养钵中育苗,每钵留苗 2 株。本试验在人工气候室内人工模拟低温,采用蛭石为介质,在 $12\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ 的营养钵内育苗,把培养钵置于 $45\text{ cm} \times 33\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的保险盒中,每个保险盒中放置 12 个营养钵,保险盒内

注入营养液,从棉花播种至出苗 60 d 左右(苗期)为主要研究阶段。试验采用两因素五水平,即 2 个温度处理(15°C 、 25°C ,分别设置在两个其它条件相同的人工气候室内)和 5 个铵硝态氮配比处理(0/100、25/75、50/50、75/25 和 100/0)。用总氮水平为 $5\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的营养液进行培养,在营养液中添加占总氮量 3% 的硝化抑制剂(DCD),每个处理均设置 3 次重复。营养液每 3d 更换一次,营养液中大量元素配方采用略加修改的 Hoagland 营养液,微量元素参照 Hammer et al.^[11] 的方法配制。

1.2 测定项目与方法

叶绿素含量采用丙酮乙醇混合法^[6]测定;使用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合系统分析仪测定各处理棉花幼苗叶片的净光合速率(Photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s)、细胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, C_i)。使用 PAM-2100 便携式叶绿素荧光仪测定叶绿素荧光参数初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、最大光化学效率 F_v/F_m 、电子传递速率 ETR 、光化学猝灭系数 qP 、非光化学猝灭系数 $NPQ(qN)$ 。每处理重复测定 5 次。

1.3 数据统计与分析

数据分析用 Microsoft Excel 2010 软件,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和差异显著性检验(Duncan 法),使用 Sigmaplot 12.5 软件绘图。

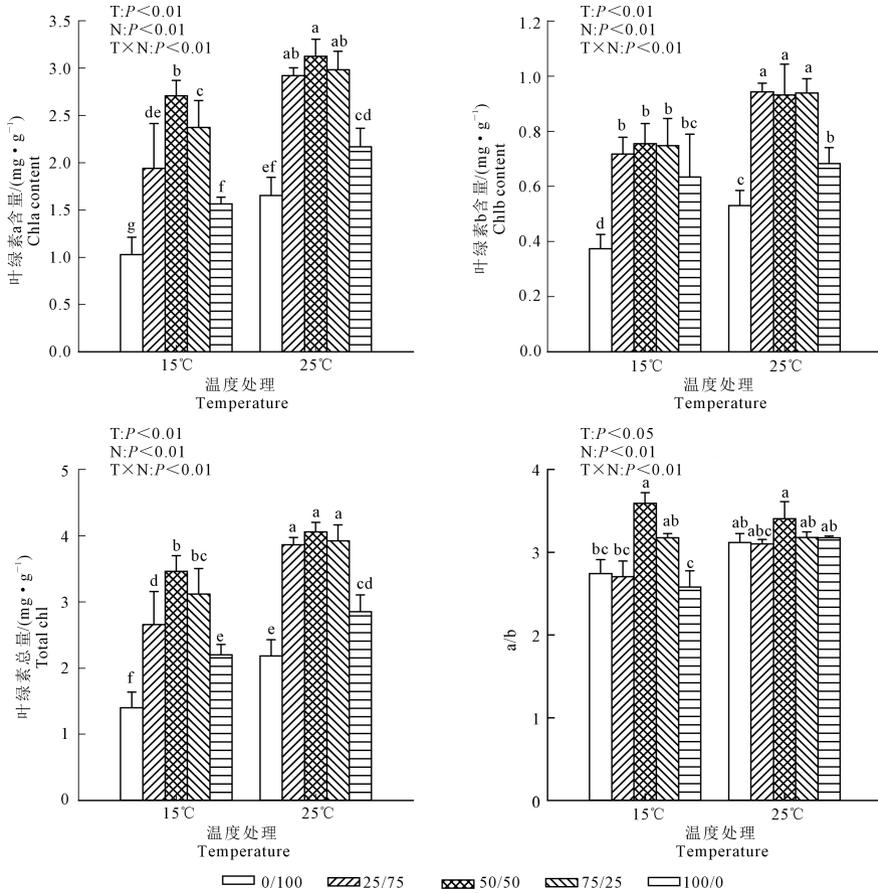
2 结果与分析

2.1 不同铵硝配比对低温胁迫下棉花幼苗叶绿素含量的影响

从图 1 可以看出,低温胁迫、不同铵硝对比对棉花幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素(a+b)含量有显著影响。在相同温度条件下,随着营养液 NH_4^+ 浓度增大,棉花幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及 a+b 呈先升高再降低的趋势,铵硝混合营养处理棉花幼苗叶绿素含量略高于纯铵处理,显著高于纯硝处理($P < 0.01$),表明在低温(15°C)胁迫和正常温度(25°C)条件下,通过增铵营养均有利于提高棉花幼苗叶绿素浓度。在叶绿素组分中,不同铵硝对比对叶绿素 a(Chl a)的影响作用明显大于叶绿素 b(Chl b),尤其在遭遇低温胁迫时;叶绿素 a/b 值呈先增大后减小的趋势,各处理间差异显著($P < 0.01$)。而相同铵硝配比条件下,低温胁迫(15°C)处理叶绿素含量均明显低于正常温度(25°C)处理($P < 0.01$)。 15°C 处理, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比为 50/50 处理叶绿素含量最

高,分别比相同温度下纯铵和纯硝营养提高 36.5%、59.5%。表明叶绿素含量因低温胁迫显著降低,但

铵硝混合营养($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 为 50/50)的供给能改善低温胁迫对叶绿素含量造成的抑制效应。



注:图中不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letter mean significant difference among treatments at the 5% level ($P < 0.05$), the same as below.

图 1 不同 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 对低温胁迫下棉花幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ on the contents of chlorophyll of cotton seedlings under low temperature stress

2.2 不同铵硝比对低温胁迫下棉花幼苗光合特性的影响

由图 2 可知,在正常 (25°C) 条件下,净光合速率 (P_n) 随着铵浓度比例的增加而增加,在纯铵营养下达到最大,处理间差异显著 ($P < 0.05$)。在逆境 (15°C) 条件下,棉苗 P_n 随着铵比例的增加呈现出先增大后减小的趋势,在 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 为 50/50 时达到最大值,之后又呈现出下降的趋势,但各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。 G_s 和 T_r 的变化趋势与 P_n 较为相似。 C_i 在正常 (25°C) 条件下随着铵比例的增加显著增大,而在逆境胁迫下则随着铵比例的增加显著降低。在相同氮素形态处理中,低温胁迫明显降低了棉苗的 P_n 、 G_s 和 T_r 。

2.3 不同氮素形态对低温胁迫下棉花幼苗叶绿素荧光特性的影响

如图 3 所示,与常温 (25°C) 处理相比,棉苗 ETR 在低温胁迫下显著降低 ($P < 0.01$)。营养液中

$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比为 75/25、100/0 和 0/100 营养处理,叶片 ETR 值在 15°C 分别比在 25°C 时相同营养处理降低了 43.8%、131.2% 和 66.2%。相同温度条件下,随着营养液中 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比例的增加棉苗 ETR 先升高后降低, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比为 75/25 处理最高。与 ETR 相似,棉花幼苗 $Yield$ 经低温处理后明显下降,与常温相比,处理间差异显著 ($P < 0.05$)。常温和低温胁迫铵硝混合营养棉苗 $Yield$ 值大于纯铵或纯硝营养处理,说明铵硝混合营养处理能缓解低温胁迫对棉苗实际光能捕获效率的影响,提高棉株 PS II 反应中心对光能的捕获率。棉花幼苗 qP 变化趋势与 ETR 、 $Yield$ 基本一致。与常温相比,低温胁迫下棉苗 qN 明显上升;随着营养液中 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比例的增大 qN 值呈先升高后降低趋势,铵硝混合营养处理 qN 值明显大于纯铵或纯硝营养处理, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 比为 50/50 时其值最大,比同温下纯铵、纯硝营养分别增大了 26.1% 和 10.2%,处理间差异显著 ($P < 0.01$)。

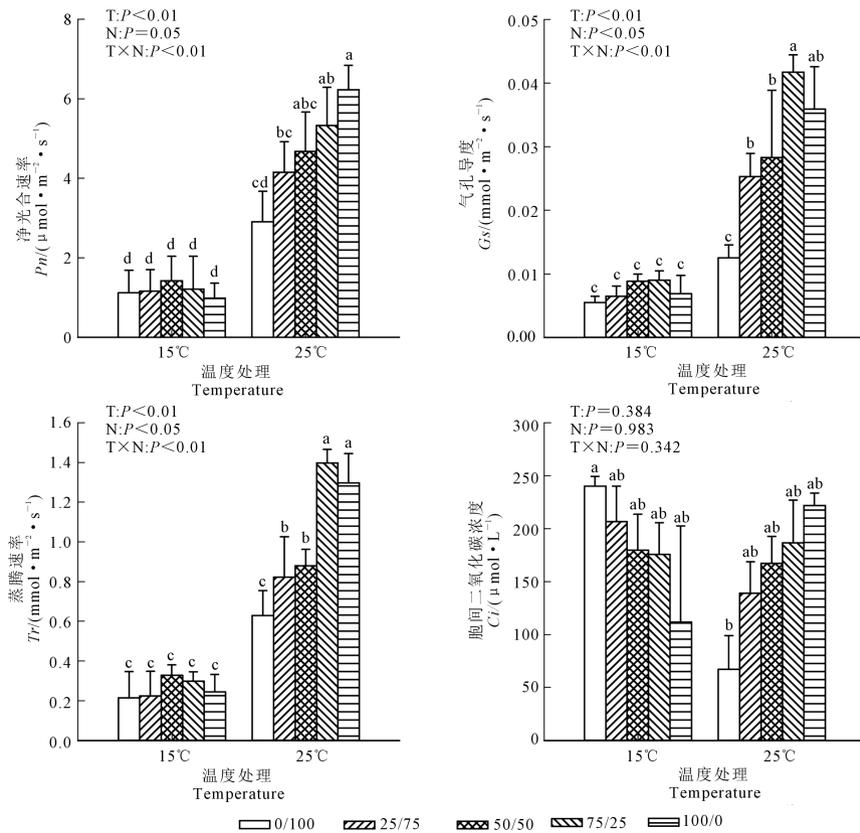


图 2 不同 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 对低温胁迫下棉花幼苗光合参数的影响

Fig.2 Effects of different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ on photosynthetic parameters of cotton seedlings under low temperature stress

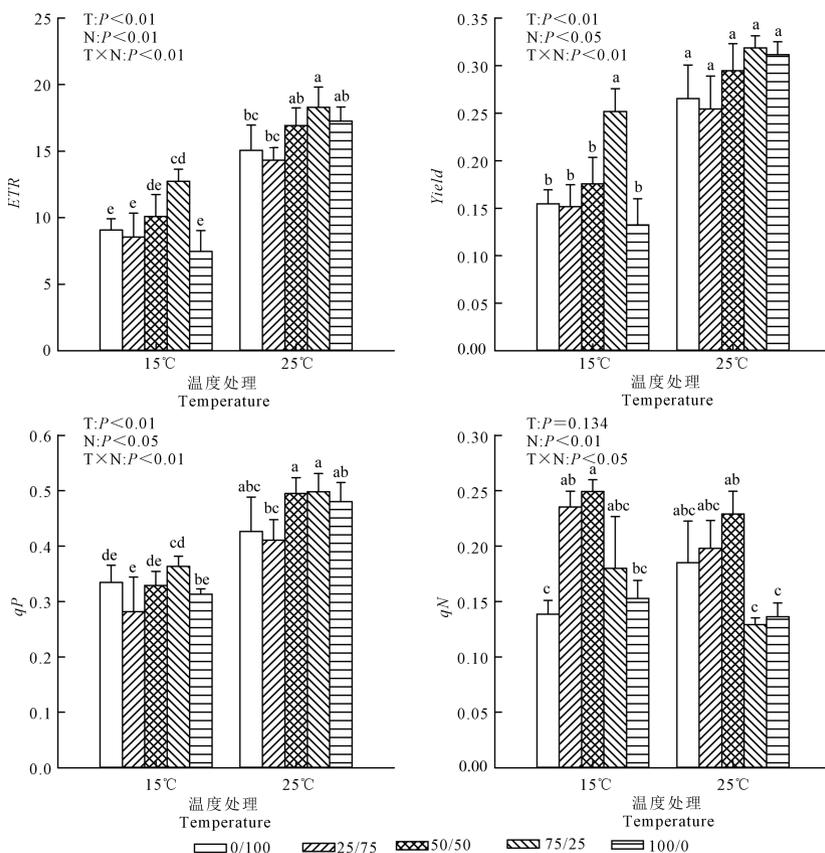


图 3 不同 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 对低温胁迫下棉花幼苗 ETR 、 $Yield$ 、 qP 、 qN 的影响

Fig.3 Effects of different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ on ETR 、 $Yield$ 、 qP 、 qN of cotton seedlings under low temperature stress

2.4 低温胁迫下不同氮素形态棉花幼苗光合特性的相关性

2.4.1 低温胁迫下不同氮素形态棉花幼苗叶绿素总量与净光合速率的相关性 低温胁迫条件下,棉花幼苗叶片叶绿素总量与净光合速率(P_n)存在极显著直线相关关系(图 4),随着叶绿素总量的增加, P_n 表现出逐渐递增趋势,叶绿素总量与 P_n 呈极显著正相关($R^2 = 0.5529$, $P < 0.01$),说明低温胁迫和不同氮素形态处理棉花幼苗叶绿素总量的变化对 P_n 影响很大,是导致 P_n 变化的重要因素。

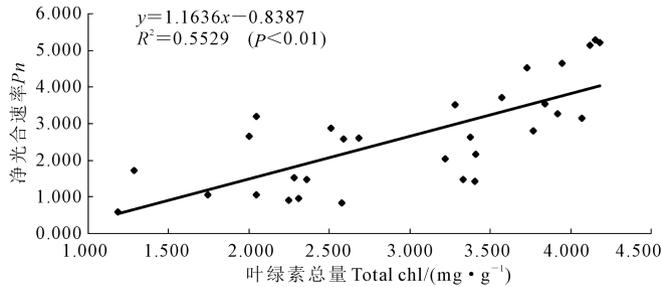


图 4 棉花幼苗叶绿素总量与净光合速率的相关性

Fig.4 Correlation of total chlorophyll content and P_n in cotton seedlings

2.4.2 低温胁迫下不同氮素形态棉花幼苗叶绿素总量与叶绿素荧光参数的相关性 将棉花苗期叶绿素总量与叶绿素荧光参数进行相关回归分析,结果如表 1。从表 1 可以看出,棉花叶绿素总量与 PS II 的 F_v/F_m 存在极显著直线相关关系,与 ETR 、 $Yield$ 、 qP 存在显著直线相关关系,但与 qN 无显著相关($p > 0.05$)。叶绿素总量与 F_v/F_m 之间的相关性最高, R^2 值达到 0.7052 ($P < 0.01$),说明叶绿素总量对 F_v/F_m 影响最大。低温胁迫条件下,随着棉苗叶绿素总量的升高, F_v/F_m 、 ETR 、 $Yield$ 、 qP 值均呈上升趋势,棉株叶绿素总量与叶绿素荧光参数有较好的线性正相关。

表 1 棉花幼苗叶绿素总量与叶绿素荧光参数的相关性
Table 1 Correlation of total Chlorophyll content and Chlorophyll fluorescence parameters in cotton seedlings

叶绿素荧光参数 Chlorophyll fluorescence parameters	线性方程 Linear equation	决定系数 R^2	P
最大光化学效率 F_v/F_m	$Y = 0.04X + 0.2545$	0.7052	0.004
光合电子传递速率 ETR	$Y = 2.2916X + 6.1698$	0.356	0.018
实际光化学量子产额 $Yield$	$Y = 0.0417X + 0.1071$	0.3537	0.023
光化学猝灭系数 qP	$Y = 0.0415X + 0.2698$	0.2942	0.033
非光化学猝灭系数 qN	$Y = 0.0173X + 0.1319$	0.1293	0.304

3 讨论与结论

众多学者认为,低温胁迫下叶绿素含量下降^[12-14]。低温胁迫抑制了植物叶绿素前体物质的

形成,降低了叶绿素的合成速率,加速了已合成叶绿素的降解,积累大量活性氧,使叶绿素生物合成酶钝化或失活^[15],这些因素都会导致植物体内叶绿素含量明显下降。本试验研究发现,经 15℃ 低温处理后,棉花幼苗叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均极显著降低,其可能原因是低温降低了叶绿素生物合成过程中酶活性,叶绿素降解速率远远大于合成速率,导致了叶绿素总量的减少。陈斌等^[16]研究发现,营养液中 $NH_4^+ - N / NO_3^- - N$ 为 7/3,苘蒿叶绿素含量最高,铵硝混合营养处理优于纯硝营养处理;孙敏红等^[17]试验结果表明,水培积橙叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量在铵硝混合营养下促进效应好于单一态氮素,且当处理为 5/5 时叶绿素含量持续增加,有利于积累。本试验结果与孙敏红结论一致,说明常温和低温胁迫下增铵营养均有利于棉苗叶绿素含量的积累,原因可能是由于营养液中铵态氮比例增加,引起作物体内铵态氮浓度的增加,进而提高了叶绿素生物合成的前体谷氨酸或 α -酮戊二酸的含量,从而促进了叶绿素的合成。

刘菲菲等^[18]、陈笑莹等^[19]研究指出,低温处理后, P_n 、 G_s 、 Tr 均减小,光合参数可作为鉴定棉花抗寒性能的指标。本试验研究结果表明,低温胁迫条件下, P_n 、 G_s 和 Tr 均大幅度降低,而 C_i 在不同铵硝营养配比处理出现上升趋势,这与刘菲菲的研究结果一致。常温条件下,随着营养液中 NH_4^+ / NO_3^- 比值升高,棉花幼苗 P_n 明显增大,同时 Tr 、 G_s 和 C_i 值也相应增大,说明常温下气孔因素是影响不同氮素形态棉花光合作用的主要限制因子;低温胁迫处理后,不良环境条件引起气孔关闭,降低了 P_n 、 Tr 和 G_s ,但 C_i 反而上升,表明非气孔因素是主要限制因子。张福锁等^[20]研究发现植物以 $NH_4^+ - N$ 为唯一氮源时, NH_4^+ 容易穿过生物膜,破坏膜结构,诱发氧化磷酸化和光合磷酸化与电子传递解耦联,抑制 CO_2 的固定和同化,降低光合作用效率,引发植物体内代谢失调。这也可能是本研究中除了铵根离子毒害外,纯 $NH_4^+ - N$ 营养处理时净光合速率和叶绿素含量较低的另一原因。

低温处理使柱花草 F_v/F_m 、PS II 电子传递量子效率、 qP 和 qN 、 P_n 及光合相关酶活性均显著降低^[21]。本试验表明,低温胁迫明显使棉花幼苗 ETR 、 $Yield$ 、 qP 及 qN 减小,这是由于低温胁迫促使棉苗 PS II 反应中心的机构损伤和天线色素的降解、光能转换效率下降导致的。这与莫亿伟等在柱花草^[21]、陈世茹等在紫花苜蓿^[22] 中的研究结果一致。乔建磊等^[23]研究指出, $NH_4^+ - N / NO_3^- - N$ 为 75/25 处

理马铃薯 PS II 光化学效率及其潜在活性较高,有利于提高叶片对光能的利用效率。本试验结果显示,常温和低温胁迫条件下,营养液铵比例增加,*ETR*、*Yield*、*qP*、*qN* 均呈先升高后降低的变化趋势,说明铵硝混合营养比单一氮形态营养处理棉花幼苗光合电子传递的速率大,PS II 反应中心保持开放,天线色素光能传递效率稳定;棉苗在低温胁迫下 PS II 反应中心受到损伤,铵硝混合营养处理能修复和补偿损伤程度,这与铵硝混合营养条件下植株通过增加热耗散,避免多余的能量在光合机构内“滞留”,减少光合细胞类囊体膜损伤,保护光合机构免受低温胁迫的伤害有关。

综上所述,低温胁迫降低棉花幼苗叶绿素含量, CO_2 固定和同化能力降低, C_i 升高, P_n 、 G_s 、 Tr 降低,*ETR*、*Yield*、*qP*及*qN*减小,最终导致光合能力下降。而同一温度条件下,铵硝混合营养($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 为50/50)能改善低温胁迫对棉苗叶绿素含量造成的抑制效应。低温胁迫(15℃)后, P_n 、 G_s 、 Tr 、*ETR*、*Yield*、*qP*及*qN*随铵比例的增加呈现出先增大后减小的趋势,说明增铵营养对低温抑制光合具有一定缓解作用,使棉苗保持相对较高光合效率。相关性研究表明,棉花幼苗叶绿素总量与 P_n 呈极显著正相关;与PS II的*Fv/Fm*存在极显著直线相关关系,与*ETR*、*Yield*、*qP*存在显著直线相关关系。

参考文献:

[1] 王波,沈其荣,赖涛,等.不同铵硝比营养液对生菜生长发育影响的研究[J].土壤学报,2007,44(3):561-565.

[2] Aronold G, van Diest. Nitrogen supply, tree growth and soil acidification[J]. Fertilizer Research, 1991, 27:29-38.

[3] Bilska A, Pawel S. Closure of plasmodesmata in maize (*Zea mays*) at low temperature: a new mechanism for inhibition of photosynthesis[J]. Annals of Botany, 2010, 106:675-686.

[4] 汪建飞,董彩霞,谢越,等.铵硝比和磷素营养对菠菜生长、氮素吸收和相关酶活性的影响[J].土壤学报,2006,43(6):954-960.

[5] 梁雄,彭克勤,杨毅.不同铵硝比对3中野菜生长和安全及营养品质的影响[J].湖南农业大学学报,2011,37(4):450-455.

[6] 洪丕征,刘世荣,王晖,等.正常和环割条件下不同形态氮素添加对红椎幼苗光合特性的影响[J].生态学报,2016,36(14):4485-4495.

[7] 贾鑫.灌水及不同氮源对马铃薯品质和产量的影响[D].太原;

山西大学,2010.

[8] Papadopoulos L. Nitrogen fertigation of greenhouse grown strawberries[J]. Fertilizer Research, 1987, 13: 269-276.

[9] Schittenhelm S, Menge-Hartmann U. Yield Formation and Plant Metabolism of Spring Barley in Response to Locally Injected Ammonium[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2006, 192: 434-444.

[10] 王荣栋,尹经章.作物栽培学[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1996:429-431,445.

[11] Hammer P A, Tibbitts T W, Langhans R W. Baseline growth studies of 'Grand Rapids' lettuce in controlled environments[J]. Annal Botany, 1989, 63: 643-649.

[12] 高丽慧,易津,李菲,等.三种禾本科牧草低温胁迫的生理响应[J].中国草地学报,2011,33(3):107-111.

[13] 徐田军,董志强,兰宏亮,等.低温胁迫下聚糠萘合剂对玉米幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].作物学报,2012,38(2):352-359.

[14] 廉洁,谷建田,张喜春.氯化钙对低温胁迫下番茄幼苗的影响[J].中国农学通报,2015,31(16):47-51.

[15] 苗微,王国娇,马殿荣,等.辽宁省杂草稻幼苗对低温胁迫的生理响应[J].中国水稻科学,2011,25(6):639-644.

[16] 陈斌,郭爱珍,韩鹏远.不同土壤水分条件下不同形态氮素对比对苜蓿生长发育的影响[J].山西农业科学,2014,42(12):1289-1293.

[17] 孙敏红,卢晓鹏,李静,等.不同氮素形态对枳橙幼苗生长特性的影响[J].湖北农业科学,2016,55(8):2014-2022.

[18] 刘菲菲,魏亦农,李志博,等.低温胁迫对棉花幼苗叶片光合特性的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2011,29(1):11-14.

[19] 陈笑莹,宋凤斌,朱先灿,等.低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米幼苗氮代谢的作用[J].华北农学报,2014,29(4):205-212.

[20] 张福锁,樊小林,李晓林.土壤与植物营养研究新动态.第二卷[M].北京:中国农业出版社,1995:42.

[21] 莫亿伟,郭振飞,谢江辉.温度胁迫对柱花草叶绿素荧光参数和光合速率的影响[J].草业学报,2011,20(1):96-101.

[22] 陈世茹,于林清,易津,等.低温胁迫对紫花苜蓿叶片叶绿素荧光特性的影响[J].草地学报,2011,19(4):596-600.

[23] 乔建磊,于海业,宋述尧,等.氮素形态对马铃薯叶片光合色素及其荧光特性的影响[J].中国农业大学学报,2013,18(3):39-44.

[24] 厉然.氮高效利用杉木家系的筛选及氮素形态对不同家系幼苗的影响[D].福州:福建农林大学,2014.

[25] 王飞,刘世增,康才周,等.干旱胁迫对沙地云杉光合、叶绿素荧光特性的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(1):142-147.