

不同供氮水平对芸豆碳氮代谢平衡的影响

孙海燕¹, 郭伟²

(1. 黑龙江八一农垦大学测试中心, 黑龙江 大庆 163319;
2. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘 要: 采用盆栽土壤基施 0、15、30 kg·hm⁻² 三个氮素水平试验, 研究了芸豆荚果形成后不同氮素水平下叶片和荚果的碳、氮代谢主要酶活性以及抗氧化酶系活性的变化。结果表明, 芸豆荚果形成后, 随着土壤供氮水平的增加, 荚果的磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性、多酚氧化酶活性、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性逐渐增强; 叶片的蔗糖合成酶活性、蔗糖磷酸合成酶活性、硝酸还原酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性大于同一供氮水平荚果的活性; 且荚果的总可溶性糖和可溶性蛋白含量高于叶片; 叶片的磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶的活性与荚果的蔗糖磷酸合成酶和硝酸还原酶活性呈显著相关性。由此可以得出, 源器官是芸豆植株的代谢活跃中心, 而库器官成为植株的生长中心, 且后者的碳、氮代谢过程主要受前者的调控。

关键词: 芸豆; 氮素; 碳氮代谢; 代谢平衡
中图分类号: S311; S529 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)05-0117-07

Effects of different nitrogen level on carbon-nitrogen metabolic balance in kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.)

SUN Hai-yan¹, GUO Wei²

(1. Test Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;
2. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: Three base nitrogen fertilizer levels, including 0, 1.5 kg·hm⁻² and 3.0 kg·hm⁻², were adopted in a pot experiment to study the changes of enzyme system of carbon-nitrogen metabolism in leaves and pods of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). The results showed that, after the formation of pods, the activity of phosphoenolpyruvate carboxylase (PEP), polyphenol oxidase (PPO), superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) in pods gradually increased with the increase of nitrogen. Under the same nitrogen level, the activity of sucrose synthase (SS), sucrose phosphate synthase (SPS), nitrate reductase (NR) and PEP in leaves was greater than that in pods, while the content of total soluble sugar and protein in pods was higher than that in leaves. The activity of PEP in leaves was correlated significantly with the activity of SPS and NR in pods. It could be concluded that, in the plants of kidney bean, the source organ was the active center of metabolism, while the sink organ was the growth center, and the carbon-nitrogen metabolism process of the latter was mainly regulated by the former.

Keywords: kidney bean; nitrogen; carbon – nitrogen metabolism; metabolic balance

源、库间辩证关系的研究一直是作物高产生理中的热点问题之一^[1]。作物产量形成的实质就是源库互作的过程, 研究源库关系的目的在于为增加库容和建立新型源库关系, 从而获得高产提供依据。不同类型作物品种, 源库代谢特点存在较大差异, 其限制产量形成的方式也不同, 研究发现, 在不同氮素营养条件下, 多数作物品种会发生产量限制的改变。如水稻盐粳 2 号在低氮和中氮条件下为库限制型, 在高氮的条件下为源库互作型^[2]。碳氮代谢是作物源库关系协调的生理基础, 决定着产量的高低^[3]。邱泽生等^[4]对小麦的研究认为, 调节碳氮平衡达到成花率和结实率的统一, 是提高穗粒数的关键。夏玉米的产量形成与施氮量的关系研究也认为, 玉米穗粒数大小与关键生育期叶片茎鞘的可溶性糖含

收稿日期: 2013-01-17
基金项目: 黑龙江省科技厅课题(GZ11B101); 校博士启动金课题(校启 2012DB-02)
作者简介: 孙海燕(1979—), 女, 内蒙古赤峰人, 助理研究员, 主要从事作物品质的研究。E-mail: shysun7908@yahoo.com.cn。
通信作者: 郭伟(19—), 男, 黑龙江绥化人, 副教授, 主要从事作物生理生态的研究。E-mail: agrigw@163.com。

量、全氮含量及 C/N 存在一定的相关性^[5]。碳氮代谢是植物体内最主要的两大代谢过程,植物通过光合作用制造的大部分能量和物质用于这两个代谢过程。由于碳氮代谢过程均需消耗碳代谢过程中产生的有机碳和能量而相互竞争,同时,NO₂⁻ 又为光合电子传递链提供电子供体,利于光合碳代谢进行,碳氮代谢是相互依存、相互制约的^[6]。例如,蔗糖、NO 均可作为信号物质诱导氮代谢相关酶活性^[7],通过施用外源蔗糖或提高供氮水平均可以提高硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性^[7-8]。因此,研究两者在不同氮供应条件下的变化及相互关系,采用必要的调控措施,以协调源库间碳氮代谢平衡,提高库容,提高单产,在农业生产上具有十分重要的意义。前期研究对于作物源库器官间碳氮代谢的相互作用的研究较少,尤其是对于芸豆的相关研究未见报道。本文探讨了芸豆以叶片和荚果为代表的源库器官间部分碳氮代谢指标的变化,以期进一步明确氮素营养与芸豆碳氮代谢的关系。

1 材料与方法

采用直径为 35 cm,高 40 cm 的硬质塑料桶土培盆栽。将取自玉米田的草甸白浆土(土壤有机质含量 38.70 mg·kg⁻¹,pH 值为 5.56,碱解氮含量 171.91 mg·kg⁻¹,有效磷含量 26.27 mg·kg⁻¹,速效钾含量 262.22 mg·kg⁻¹)过筛,去掉杂草、根茬、土块等杂物,每盆称重填土,等量浇灌。在表土下 18~20 cm 处使用 KH₂PO₄ 和 NaH₂PO₄ 化学纯试剂,用量为 6 g·m⁻²,N:P:K = 1:2.2:0.8,同时,试验处理为尿素不同用量(纯 N 用量,试验代号 N0、N1 和 N2):0、15、30 kg·hm⁻²。每个处理 4 盆,重复 3 次。

试验用芸豆(*Phaseolus vulgaris* L.)品种为垦芸 2 号(黑龙江省农垦科研育种中心经济作物研究所选育),每盆定植 5 株。培养过程中同时、等量浇灌,待荚果形成后 15 d 取样。分取叶腋处结荚的叶片及其荚果,鲜样混合后称重,然后液氮速冻,-80℃低温冰箱保存待测定。鲜样取定后剩余的叶片和荚果,分别混合称重、烘干后测定干重。

叶片和荚果的氮含量利用凯氏定氮仪测定;硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)活性测定用 NADH 比色法^[9];可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝法^[10];总可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[10];蔗糖含量测定采用间苯二酚比色法^[10];蔗糖合成酶(sucrose synthetase, SS)和蔗糖磷酸合成酶(sucrose phosphate synthase, SPS)活性测定采用 UDPG 比色

法^[10],超氧阴离子自由基(superoxide anion free radical, O₂⁻)含量测定采用羟胺比色法^[10];丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[10],超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑法^[10];过氧化氢酶(catalase, CAT)活性采用紫外分光光度法^[10];过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法^[10];多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性测定采用比色法^[10];磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(phosphoenolpyruvate carboxylase, PEP)活性测定采用紫外分光光度法^[11]。上述指标均采用平行测定方式。

碳氮比(C/N) = 可溶性糖含量/氮含量^[5]

利用 Excel 2007 进行数据处理和制图,SAS 8.2 进行统计分析,新复极差法进行 5% 的差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 施氮量对芸豆源、库氮代谢的影响

由图 1-A 可知,土壤的氮素供应能力对叶片和荚果的氮含量影响较小,而荚果的氮含量高于叶片;随着供氮水平的提高,叶片和荚果的可溶性蛋白质含量显著增加,荚果的可溶性蛋白质含量在 N1 水平下即增加,叶片的可溶性蛋白质含量在 N2 水平下开始提高,可见,供氮能力的提高促进了叶片的蛋白质向荚果的输出(图 1-B);随着施氮量的增加,荚果的 PEP 活性逐渐增强,而对叶片的 PEP 活性影响较小(图 1-C);施氮量对芸豆叶片和荚果的 NR 活性影响不显著,但前者的 NR 活性却小于后者(图 1-D)。

2.2 施氮量对芸豆源、库碳代谢的影响

由图 2-A 可知,土壤的氮素供应能力对叶片和荚果的总可溶性糖含量影响较小,但荚果的总可溶性糖含量有随氮素供应增加而降低的趋势,且明显高于叶片;叶片和荚果的蔗糖含量与总可溶性糖含量相似,受氮素供应量影响不显著,而叶片蔗糖的含量明显高于荚果(图 2-B);随土壤供氮能力的增加,叶片的 SS 活性和 SPS 活性呈现降低的趋势,但影响不显著,且叶片两种酶活性显著高于荚果(图 2-C 和 D)。在不同土壤供氮能力条件下,叶片也是碳素同化的中心,是荚果碳水化合物的主要来源。

2.3 芸豆源、库干物质积累与碳氮代谢的关系

由图 3 可知,随着氮供应水平的提高,芸豆叶片干物质积累量逐渐增加,而荚干物质积累量差异较小,干物质在地上其他部分中大量积累。

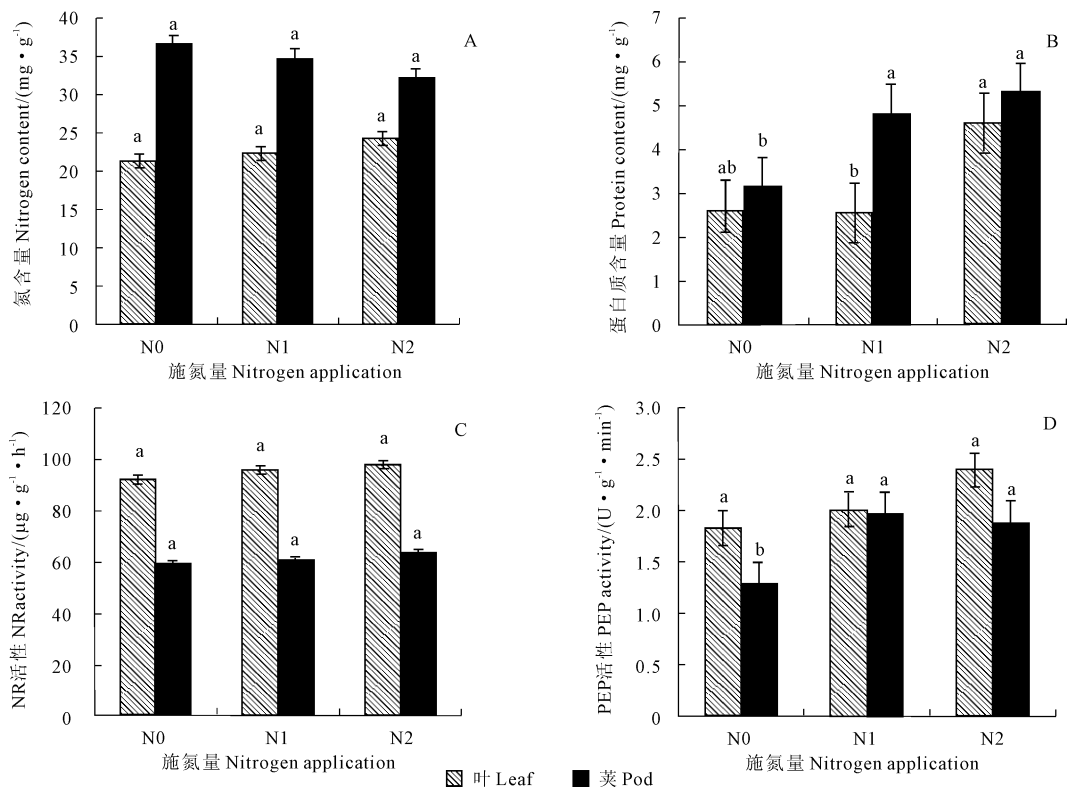


图 1 施氮量对芸豆源库氮代谢的影响

Fig.1 Effect of nitrogen application on nitrogen metabolism in shoot and root of kidney bean
注:相同的小写字母表示处理间差异不显著($P < 0.05$),以下相同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, the same as in the following.

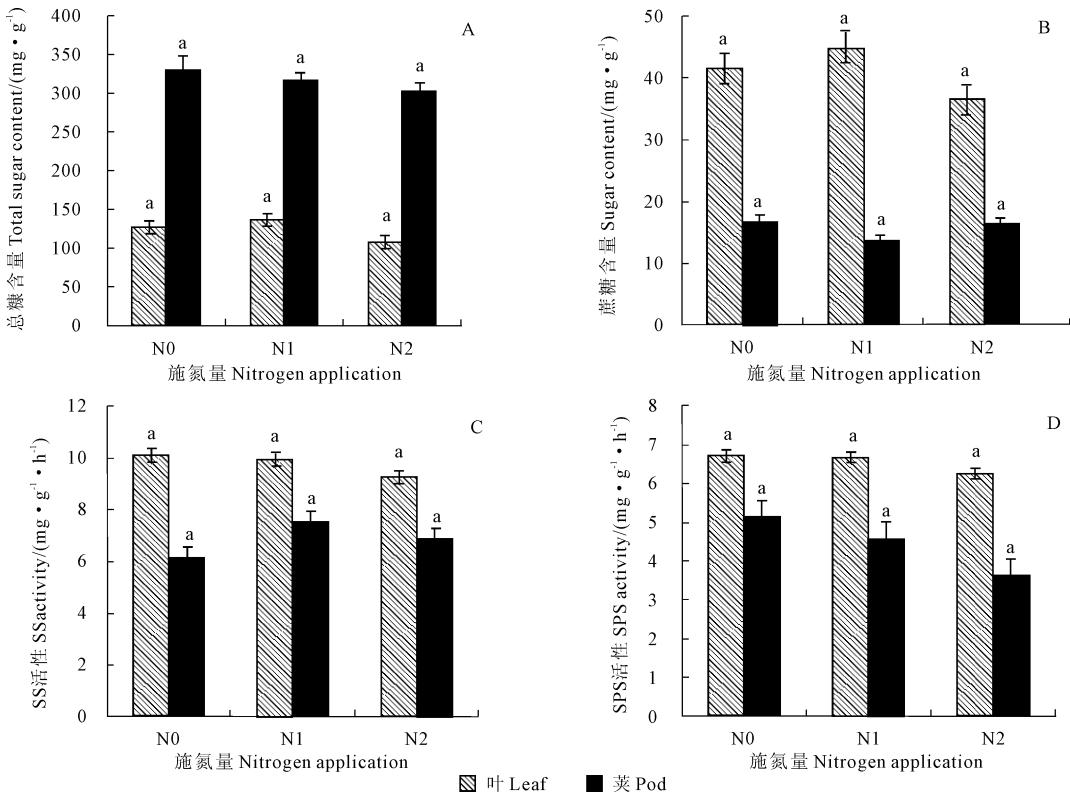


图 2 施氮量对芸豆源库碳代谢的影响

Fig.2 Effect of nitrogen application on carbon metabolism in shoot and root of kidney bean

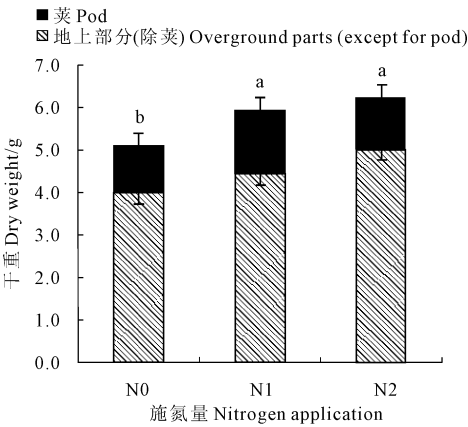


图 3 施氮量对芸豆地上部分干物质积累的影响

Fig.3 Effect of nitrogen application on dry weight of overground parts

由表 1 可知,不同氮供应能力下,芸豆叶片含氮量与 PEP 活性显著正相关,叶片总可溶性糖含量的高低主要取决于蔗糖的积累;荚果的氮代谢中心酶

NR 活性与叶片的氮含量和叶片 PEP 活性显著正相关,与叶片 SS 活性显著负相关;荚果总可溶性糖积累与叶片 NR 活性呈显著负相关。

2.4 施氮量对芸豆源、库衰老的影响

由图 4 - A、F 可知,随施氮量的增加叶片和荚果的 O₂⁻ 含量和 MDA 含量呈现增加的趋势,但处理间差异不显著,且叶片的 O₂⁻ 含量高于荚果的各相同处理,而 MDA 含量相反,前者显著低于后者,可见,高氮条件下荚果的衰老早于叶片;作为抗氧化酶系活性的调节因子,O₂⁻ 含量的增加导致了 SOD 活性、CAT 活性和 POD 等酶活性的增强,但不同施氮量处理对叶片和荚果 O₂⁻ 清除酶系的影响存在一定差异(见图 4 - B、C、D)。叶片的 SOD 活性、CAT 活性和 POD 活性受施氮量的影响较小,但荚果的这三种酶活性受施氮量的影响显著,氮供应能力的增加会不同程度地增强荚果的 O₂⁻ 清除酶系活性。

表 1 芸豆源库碳氮代谢间相关系数

Table 1 The correlation coefficients among carbon and nitrogen metabolism indices in kidney bean

项目 Item	叶氮 Nitrogen of leaf	叶 NR NR of leaf	荚 NR NR of pod	叶 PEP PEP of leaf	叶总糖 Total sugar of leaf	荚总糖 Total sugar of pod	叶蔗糖 Sucrose of leaf	叶 SS SS of leaf	荚 SPS SPS of pod
叶氮 Nitrogen of leaf	1.000								
叶 NR NR of leaf	0.944	1.000							
荚 NR NR of pod	0.997*	0.915	1.000						
叶 PEP PEP of leaf	0.999*	0.939	0.999*	1.000					
叶总糖 Total sugar of leaf	-0.758	-0.499	-0.807	-0.784	1.000				
荚总糖 Total sugar of pod	-0.957	-0.999*	-0.932	-0.945	0.537	1.000			
叶蔗糖 Sucrose of leaf	-0.713	-0.441	-0.766	-0.741	-0.998*	0.479	1.000		
叶 SS SS of leaf	-0.989	-0.887	-0.998*	-0.995	0.843	0.906	0.805	1.000	
荚 SPS SPS of pod	-0.999*	-0.951	-0.995	-0.999*	0.742	0.964	0.696	0.986	1.000

注:差异显著性为 * $P < 0.05$ 。 Note: * Significant difference at $P < 0.05$.

PPO 作为植物氧化还原酶系的代表之一,能够在一定程度上反映不同施氮量条件下,芸豆源、库的氧化还原能力。由图 4 - E 可知,随施氮量的增加荚果的 PPO 活性先升高后降低,酶活性峰值出现在 N1 处理,叶片的 PPO 活性的变化与荚果相似,且高于后者,但不同施氮量处理间差异不显著。

由上述分析可知,在高氮条件下,芸豆荚果的衰老早于叶片,主要是前者的综合代谢能力弱于后者,尤其是 O₂⁻ 清除酶系的活性。

由表 2 可知,叶片的 O₂⁻ 清除酶系(SOD、CAT、POD)活性间显著正相关;荚果的 O₂⁻ 含量与其清除酶系活性间显著正相关;同时,荚果的 O₂⁻ 含量和

SOD 活性与叶片的 O₂⁻ 含量显著正相关。可见,荚果的衰老早于叶片,荚果 O₂⁻ 含量的增加是植株抗氧化能力增强的主要诱导因子之一。

2.5 芸豆源、库衰老与碳氮代谢的关系

由表 3 可知,叶片的氮含量和 PEP 活性与叶片抗氧化酶系活性呈显著正相关,而荚果的 SPS 活性与之呈显著负相关;荚果蛋白质含量与荚果 POD 活性、O₂⁻ 含量呈正相关,与 MDA 含量呈显著负相关。可见,在不同土壤供氮能力下,源器官的抗衰老能力与其氮代谢能力同向变化,而与其碳代谢能力反向变化。

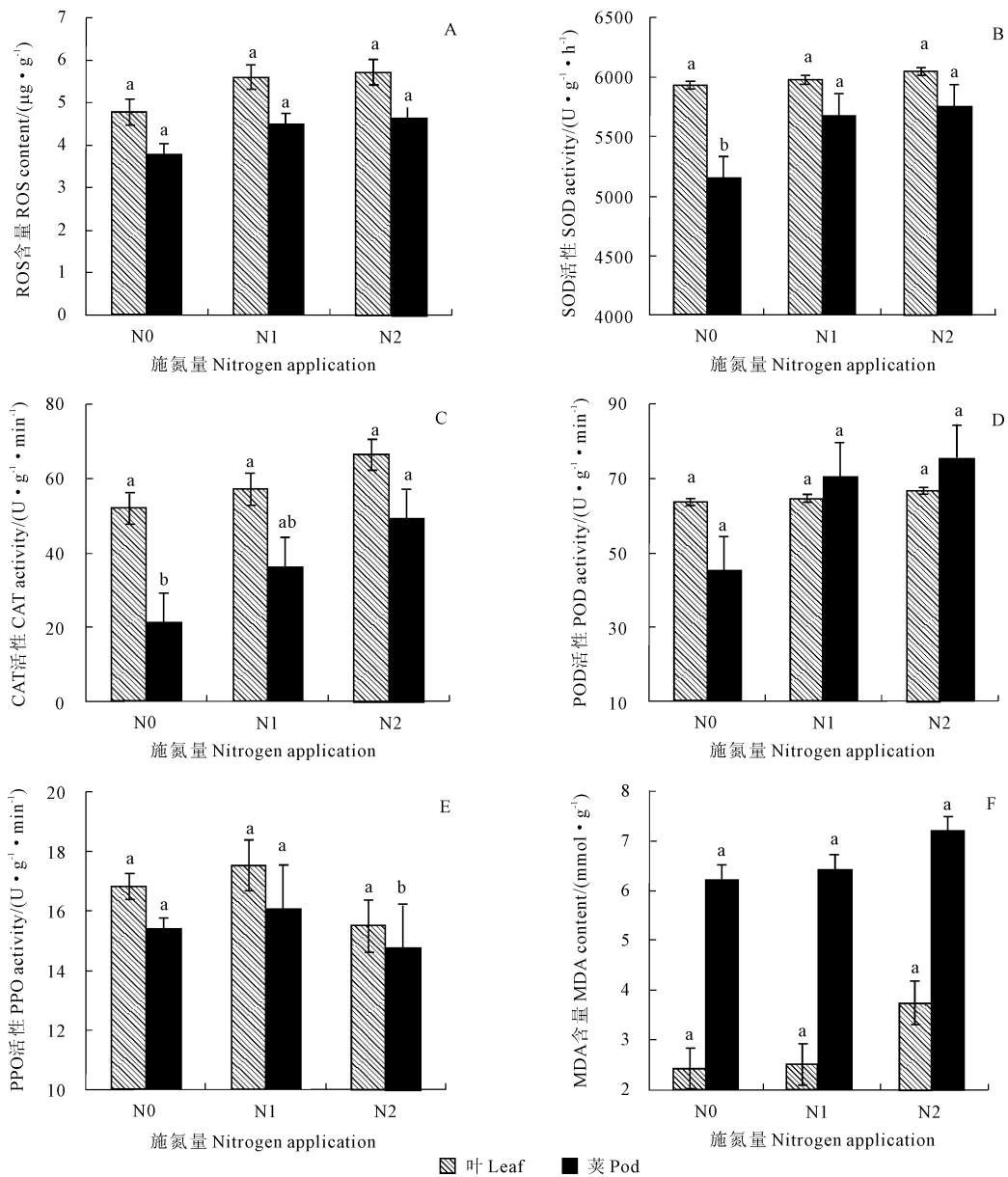


图 4 施氮量对芸豆源库器官衰老的影响

Fig.4 Effect of nitrogen application on organ aging of shoot and root

表 2 芸豆源库间衰老指标相关系数

Table 2 The correlation coefficients among organ aging indices of shoot and root

项目 Item	叶 O ₂ ⁻ O ₂ ⁻ of leaf	叶 SOD SOD of leaf	叶 CAT CAT of leaf	叶 POD POD of leaf	荚 O ₂ ⁻ O ₂ ⁻ of leaf	荚 SOD SOD of leaf	荚 POD POD of leaf
叶 O ₂ ⁻ O ₂ ⁻ of leaf	1.000	0.859	0.847	0.819	0.998*	0.999*	0.999*
叶 SOD SOD of leaf	0.859	1.000	0.999*	0.997*	0.887	0.855	0.874
叶 CAT CAT of leaf	0.847	0.999*	1.000	0.998*	0.876	0.843	0.863
荚 O ₂ ⁻ O ₂ ⁻ of leaf	0.998*	0.887	0.876	0.850	1.000	0.998*	0.999*
荚 SOD SOD of leaf	0.999*	0.855	0.843	0.814	0.998*	1.000	0.999*

注:差异显著性为 * $P < 0.05$ 。 Note: * Significant difference at $P < 0.05$.

3 结论与讨论

芸豆荚果形成后,库(荚果)成为生长中心,蛋白质和碳水化合物大量积累,荚果的总可溶性糖和蛋

白质含量远高于叶片,但源器官(叶片)仍然是植株的代谢活跃中心,其碳氮代谢的主要酶系活性均高于库器官;库器官的碳、氮代谢水平取决于源端的碳氮代谢平衡,尤其是 PEP 活性的高低。

表 3 芸豆源库碳氮代谢与衰老指标间的关系

项目 Item	叶 SOD SOD of leaf	叶 CAT CAT of leaf	叶 POD POD of leaf	叶 MDA MDA of leaf	荚 O ₂ ⁻ O ₂ ⁻ of pod	荚 POD POD of pod	荚 MDA MDA of pod
叶氮 Nitrogen of leaf	0.999*	0.999*	0.999*	0.959	0.869	0.856	0.988
叶 PEP PEP of leaf	0.997*	0.999*	1.000*	0.969	0.848	0.834	0.993
叶 SS SS of leaf	-0.984	-0.988	-0.994	-0.989	-0.790	-0.773	-0.999*
叶 SPS SPS of leaf	-0.958	-0.964	-0.976	-0.999*	-0.716	-0.698	-0.995
荚蛋白质 Protein of pod	0.906	0.896	0.872	0.723	0.999*	0.997*	0.806
荚 NR NR of pod	0.993	0.995	0.999*	0.978	0.828	0.813	0.996
荚 SPS SPS of pod	-0.999*	-0.999*	-0.998*	-0.952	-0.881	-0.868	-0.983

注:差异显著性为 * $P < 0.05$ 。 Note: * Significant difference at $P < 0.05$.

库端的氮含量和可溶性蛋白质含量均高于源端,而氮代谢关键酶活性不及源端,可见源端是植株的氮代谢活跃中心,而库不但是碳素的主要贮藏器官,也是氮素的贮藏器官。叶片含氮量增加同时,荚果含氮量和总可溶性糖含量减低,源库的 C/N 均下降。玉米的源库关系及碳氮代谢研究也认为,氮素转运对籽粒的贡献率远大于干物质转运对籽粒的贡献率^[3,12]。

从本研究结果分析,土壤供氮能力的提高利于源(叶片)库(荚果)干物质的积累总量的增加(N0~N2,分别为 2.54 g、2.95 g、3.10 g),但基施氮肥水平提高 2 倍(由 N1 增加到 N2),而干重增幅由 16.14% 降至 5.09%,同时,荚果的干重由 0.73 g(N1)降至 0.58 g(N2)。可利用的非结构性碳水化合物残留在叶片中,暗示着库容的不足^[13]。较高的供氮能力保持了源的氮代谢活性,保证了库的碳氮代谢底物的供应,但在高氮供应条件下,源端的碳氮产物消耗也随之增加,库端代谢底物的供应强度降低,库容的减低加剧了库端衰老,从而诱导源端的代谢内耗,减少了碳水化合物的积累和运转。

Anil 和 Narinder^[14]也认为植物体内运输的蔗糖具有信号功能,可以使一些基因被诱导,使另一些基因被阻遏,对源库关系起调控作用,低糖含量往往导致 NR 活性降低^[15-16]。对水分胁迫下 SPS 变化研究也发现,无论 SPS 活性是降低、增加,还是不变^[17],光合产物转化成蔗糖的比例总是提高的。也有研究表明,硝酸盐不需进一步代谢便可在输入后作为信号而调节很多的碳水化合物代谢进程和淀粉代谢^[18],因而不同的糖和氮信号转导途径可以相互响应。本研究中,源库器官的蔗糖水平与源、库碳氮代谢过程的主要酶系活性和物质代谢相关不显著,源器官的氮含量与之相关也不显著,但与库端的碳氮代谢主要酶系活性显著相关。可见,土壤的高浓

度氮供应下,库的碳氮代谢主要决定于源的碳氮代谢平衡。

碳代谢和氮代谢两个生理过程的联系点在于由 GS 和 GOGAT 共同催化的 α -酮戊二酸和 NH_4^+ 的反应,叶片制造的光合产物是用于氮同化还是用于碳同化,可能取决于 SPS 活性与 NR 活性的比例^[19]。NR 是典型的诱导酶,受其催化底物硝酸盐的诱导^[20],因此,供氮水平对碳氮代谢的调控效应很重要^[21-22]。不同供氮条件下,芸豆荚果的 NR 和 SPS 活性均与叶片的 PEP 活性显著相关,前者为正相关,后者为负相关,随着供氮能力的提高,前者逐渐增大,后者逐渐降低,因此, NR/SPS 活性比由 11.6 增加到 17.6,而荚果的 C/N 由 9.25 降至 8.0,这一过程伴随着叶片 PEP 活性的逐渐增强。所以,可将叶片 PEP 活性作为植株体碳氮代谢平衡的重要标志。

参 考 文 献:

[1] 凌启鸿.作物群体质量[M].上海:上海科学技术出版社,2000.
[2] 曹显祖,朱庆森.水稻品种的库源特征及其型划分的研究[J].作物学报,1987,13(4):265-271.
[3] 戴明宏,赵久然,杨国航,等.不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J].中国农业科学,2011,44(8):1585-1595.
[4] 邱泽生,刘捷平,黄勤妮,等.冬小麦的小花发育与碳氮代谢的关系[J].作物学报,1980,6(3):139-146.
[5] 申丽霞,王 璞,兰林旺,等.施氮对夏玉米碳氮代谢及穗粒形成的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(6):1074-1079.
[6] Silveira JAG, Melo ARB, Vie'gas RA, et al. Salinity - induced effects on nitrogen assimilation related to growth in cowpea plants[J]. Environ. Exp. Bot., 2001,46:171-179.
[7] 王志强,丁 立,徐晋豫,等.蔗糖预处理对盐胁迫小麦幼苗氮同化的影响[J].河南农业大学学报,2008,42(3):268-272.
[8] 赵 春.盐胁迫下小麦氮代谢关键酶活性及籽粒品质研究[J].安徽农业科学,2010,38(2):646-647.
[9] 中国科学院上海植物生理研究所.现代植物生理学实验指南[M].北京:科学出版社,2004.

[10] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[11] 刘 萍, 李 明. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[12] Cliquet JB. C and N mobilization from stalk and leaves during kernel filling by ¹³C and ¹⁴N tracing in zea maize[J]. Plant Physiology, 1990, 94: 1547-1553.

[13] 易镇邪, 王 璞, 张红芳, 等. 氮肥类型与施用量对华北平原夏玉米源库关系的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 294-330.

[14] Anil K G, Narinder K. Sugar signalling and gene expression in relation to carbohydrate metabolism under abiotic stresses in plants[J]. J. Biosciences, 2005, 30(5): 761-776.

[15] Cheng C L, Acedo G N, Cristinsin M, et al. Sucrose mimics the light induction of Arabidopsis nitrate reductase gene transcription[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 1992, 89: 1861-1864.

[16] Lee H J, Titus J S. Relationship between nitrate reductase activity and level of soluble carbohydrates under prolonged darkness in MM. 106 apple leaves[J]. J. Hortic. Sci., 1993, 68: 589-596.

[17] 邓英毅, 郑 虚. 作物叶中蔗糖磷酸合成酶的生物学功能与调控的研究进展[J]. 广西科学院学报, 2009, 25(1): 65-71.

[18] 谢祝捷, 姜 东, 戴廷波, 等. 植物的糖信号及其对碳氮代谢基因的调控[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(4): 399-405.

[19] 李建敏, 王振林, 高荣岐, 等. 强、弱筋小麦籽粒形成期蔗糖、淀粉合成相关酶活性及其与氮代谢的关系[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1019-1026.

[20] Crawford N M. Nitrate nutrient and signal for plant growth[J]. Plant Cell, 1995, 7(7): 859-868.

[21] 关义新, 林 葆, 凌碧莹. 光氮及其互作对玉米幼苗叶片光合和碳氮代谢的影响[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 806-812.

[22] Cr  t   P, Caboche M, Meyer C. Nitrite reductase expression is regulated at the post-transcriptional level by the nitrogen source in Nicotiana glauca and Arabidopsis thaliana[J]. Plant J., 1997, 11(4): 625-634.

(上接第 109 页)

4 结论与讨论

本试验表明,高海拔旱地油菜土壤有效贮水量在油菜生长发育前期较大,后期较小,这可能与不同油菜发育期对需水量的多少有关,油菜生长前期对土壤水分需求量较小,后期较大。直接影响旱地土壤有效贮水量的关键因素是降水量,降水量与 0 ~ 100 cm 土层平均有效贮水量呈极显著正相关,降水增加贮水量增加。在本试验条件下,降水每增加 10 mm,0 ~ 100 cm 土层平均有效贮水量增加 9.61 mm。土壤有效贮水量对油菜产量影响关键时段是油菜薹花期和角果发育期,这两个发育期 0 ~ 100 cm 土层平均有效贮水量多,油菜产量增加,反之产量减少。在气候变化过程中,日平均温度、积温对油菜产量影响较明显,在高海拔地区日平均气温升高,积温增加,不利于油菜产量提高,反而使油菜产量减少。

本研究从高海拔旱地油菜对环境条件的响应出发,按发育阶段用统计学原理定量分析不同播期油菜生育期间土壤有效贮水量动态变化以及水、热条件与产量的关系,揭示了油菜产量对土壤贮水量和热量的响应方式。提出在不同气候年景下,通过播期调整、改变种植技术和种植结构等措施,对积极适应气候变化、提高油菜高产稳产方面有着积极意义。农作物应对气候变化的研究有许多不确定性,为了

扩大涵盖面,应该在气候多因子影响方面深入探讨,探索更多的方法提高土壤水分利用率,保持油菜高产稳产。油菜产量不稳定及差异是多要素综合影响结果,这种差异不仅仅是受气候要素的影响,可能还与肥料、地理环境和自身生理特征等因素有关,这些有待进一步深入研究。

参 考 文 献:

[1] 王鹤龄,王润元,邓振镛,等. 甘肃省过去 20 年作物布局演变及其变暖的响应研究[C]//中国西北地区农作物对气候变化的响应,北京:气象出版社,2008:236-242.

[2] 肖国举,张 强,王 静. 全球气候变化对农业生态系统影响的研究进展[J]. 应用生态学报,2007, 18(8): 1877-1885.

[3] 刘德祥,董安祥,梁东升,等. 气候变暖对西北干旱区农作物种植结构的影响[J]. 中国沙漠,2007, 27(5): 687-691.

[4] 李 然,冯中朝. 中国油菜单产增长要素贡献率分析[J]. 中国油料作物学报,2010, 32(1): 152-155.

[5] 孙培良,徐法彬,杨士恩,等. 聊城土壤水分年际变化规律研究[J]. 中国农业气象,2009, 30(S2): 193-195.

[6] 李贤胜,尚 健,胡德春,等. 宣城市主要旱耕地土壤类型的水分特征[J]. 土壤,2006, 38(3): 349-351.

[7] 张仁陟,李小刚,胡 华,等. 甘肃黄土地区农田土壤水分变异规律研究[J]. 水土保持学报,1998, 4(4): 53-59.

[8] 张国胜,李 林,徐维新. 青海省东部农业区旱地土壤水分演变特征分析[J]. 中国沙漠,2000, 20(3): 314-316.

[9] 赵聚宝,梅旭荣. 晋东南地区旱地农田土壤水分状况及水分循环特征[J]. 中国农业科学,2009, 25(6): 1-8.