植物营养与肥料学报 2013,19(6):1494-1501
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0626

甘薯叶光合特性与块根主要性状对氮素供应形态的响应

唐忠厚[1,2],李洪民[1],张爱君[1],史新敏[1],魏 猛[1],陈晓光[1],丁艳锋[2]
(1 中国农业科学院甘薯研究所,农业部甘薯生物学与遗传育种重点实验室,江苏徐州 221131;
2 南京农业大学农学院,南京 210095)

摘要:为探明甘薯叶光合特性与块根主要性状对不同氮素形态供应的响应特点,以徐薯18为研究对象,在盆栽条件下,设置铵态氮、硝态氮和酰胺态氮3种氮素处理,研究不同形态氮素供应对甘薯叶光合特性、块根产量与品质性状影响的差异。结果表明,在移栽后30 d和50 d时,酰胺态氮处理叶片叶绿素含量(CCI)为最高,70 d时,铵态氮处理的CCI最高;铵态氮处理显著提高叶片的光合速率与有效辐射(PAR);氮素处理明显提高甘薯块根产量,其中,铵态氮处理较硝态氮和酰胺态氮处理块根产量分别增加10.6%与17.2%,增产显著($P<0.05$);铵态氮处理提高甘薯块根的淀粉率和蛋白质含量,而酰胺态氮处理增加可溶性糖和还原糖含量;铵态氮处理有利于增加甘薯淀粉最高粘度值(PKV)、崩解值(BDV)和回复值(CSV),而硝态氮处理促进最低粘度值(HPV)和最终粘度值(CPV)的上升。

关键词:甘薯;氮素形态;叶光合特性;块根主要性状
中图分类号:S 531;S143.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)06-1494-08

Responses of nitrogen supply forms on leaf photosynthetic characteristics and root characters of sweetpotato

TANG Zhong-hou[1,2], LI Hong-min[1], ZHANG Ai-jun[1], SHI Xin-min[1], WEI Meng[1],
CHEN Xiao-guang[1], DING Yan-feng[2]
(*1 Sweet Potato Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Sweet Potato Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture, Xuzhou, Jiangsu 221121, China;*
2 College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to study the effect of different nitrogen supply forms on leaf photosynthetic characteristics, root yield and quality of sweetpotato, a pot experiment was conducted with three nitrogen forms, NH_4^+-N [$(NH_4)_2SO_4$], NO_3^--N($NaNO_3$) and $CONH_4$-N(urea) using sweetpotato cv. Xushu18. The results showed the chlorophyll contents(CCI) with $CONH_4$-N were the highest after 30 d and 50 d of planting, while CCI with the NH_4^+-N was the highest in 70 d. The photosynthetic rate and photosynthetically active radiation(PAR) under the NH_4^+-N treatment are the highest. The NH_4^+-N treatment could promote more photosynthesis of sweetpotato leaves, and the yield under the NH_4^+-N treatment is higher than those of the NO_3^--N and $CONH_4$-N treatments, increased by 10.6% and 17.2%, respectively. There are significant differences($P<0.05$) between the NH_4^+-N treatment and other treatments. Meanwhile, the starch content and protein content of sweetpotato roots under the NH_4^+-N treatment are the highest, while the soluble sugar content and reducing sugar content under the $CONH_4$-N treatment are the highest. The NH_4^+-N treatment promotes the values of peak viscosity, breakdown and consistence of

收稿日期:2013-01-29 **接受日期**:2013-05-06
基金项目:科技部"863"计划(2012AA101204);农业部国家甘薯现代产业体系建设项目(CARS-11-07B);江苏省科技支撑计划(SBE201230424)项目资助。
作者简介:唐忠厚(1975—),男,安徽枞阳人,博士研究生,主要从事甘薯栽培生理与品质调控方面的研究。E-mail: zhonghoutang@sina.com

sweetpotato starch, and the NO_3^--N treatment promotes the values of through viscosity and final viscosity.

Key words: sweetpotato; nitrogen forms; leaf photosynthetic characteristics; root characters

甘薯[*Ipomoea batatas* (L.) *Lam*]是我国重要的地下根茎淀粉作物,2010 年种植面积约 460×10^4 hm^2,约占世界甘薯种植面积的 50%,年产量约 1.0×10^8 t,占世界甘薯总产量的 75.3%[1]。近年来,随着人们对甘薯认识观念的改变,我国甘薯研究重点从高产、稳产转向优质、高产和高效,逐渐深入到品质的改良、生理生态调控与高产优质栽培技术等研究方向。

氮素既是作物重要的结构物质,又是酶的主要成分,对作物生理代谢和生长极其重要[2];在调控作物植株生长和品质改良的诸多因素中,施氮是最为有效的方法之一。氮素主要以铵态氮、硝态氮和酰胺态氮 3 种形态存在;一直以来,国内外学者围绕不同形态氮素对作物生长发育与代谢的影响开展了大量的研究,其中对小麦的研究较系统,Wang 等[3]、Cramer 等[4]、马新明等[5]、马宗斌等[6]和吴金芝等[7]等分别研究氮素形态对小麦叶光合作用、气体交换、氮代谢与蛋白质含量、子粒内源激素、淀粉产量与淀粉糊化特性等方面的影响差异;在甜菜[8]、马铃薯[9]、烟草[10]、大豆[11]等作物上也有报道;史春余等[12]在大田生产条件下,研究了施用不同形态氮对甘薯生长发育过程中吸收根活力变化和氮素吸收动态、收获期氮素积累量和分配以及块根产量的影响,认为甘薯施用铵态氮肥有利于高产和高效;但氮形态对甘薯叶光合特性及块根品质的影响尚未见报道,基于此,本研究在盆钵中设置 3 种不同氮形态处理,旨在探索甘薯叶光合特性、块根主要性状对不同氮素供应形态的响应,以期为该方面的深入研究和大田生产提供参考,进一步推进氮素在调控甘薯植株生长和品质改良上的应用。

1　材料与方法

1.1　试验设计

盆栽种植: 以徐薯 18 为材料,试验设在江苏徐州甘薯研究中心网室内,盆钵沙栽(装重约 15 kg 经冲洗过的沙,肥力接近空白),每盆栽 3 株(20 d 后去除 2 株,保持薯苗早期长势基本一致),生长期间避雨,定期适度补水,其它同常规管理。

氮肥处理: 不施氮对照(N0)、施铵态氮(N1)、硝态氮(N2)和酰胺态氮(N3)共 4 个处理,N1、N2 和 N3 处理所用肥料分别为 $(NH_4)_2SO_4$、$NaNO_3$ 和 $(NH_2)_2CO$,均为分析纯。每处理施纯氮 5 g,折合肥料用量分别为 23.5 g、30.3 g 和 10.7 g,按 1∶1 分为基肥(栽插前)和追肥(25 d 后)两次施入。另施磷肥(P_2O_5)、钾肥(K_2O)均 5 g,生物菌肥(主要功能组分为硼、锌、镁等矿质元素和有益菌群等的混合物)10 g,全部作基肥一次施入,每盆上层均覆未混肥的沙 5cm 厚,以避免氮素的挥发损失,每处理重复 5 次。

薯苗于 5 月上旬栽插,10 月上旬收获,生育期 150 d 左右。

1.2　测定项目与方法

叶绿素与光合特性参数的测定: 在不同生长期选择完全展开顶 3 叶,用 OPTI CCM-200 叶绿素含量测定仪(美国 OPTI 公司)分别在栽插后 30 d、50 d、70 d 和 90 d 测定叶绿素含量。同时于当天 10:00～13:00,利用便携式 LCA4 光合测定仪(英国 ADC 公司)测定叶片光合作用,包括有效辐射(PAR)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、蒸腾速率(E)以及光合速率(Pn)等指标。

收获后每盆取健壮薯块样品,清洗,风干,去皮,切细条,分装,于 75℃烘箱干燥 24 h,计算烘干率(干物质率)。通过 CT410 旋风磨粉机(瑞典 FOSS 公司)高速粉碎,过 0.2 mm 筛,密封保存备用。

品质性状指标测定由中国农业科学院甘薯研究所品质分析实验室承担,淀粉率、蛋白质含量、可溶性糖和还原性糖含量采用近红外数学模型进行分析(德国 BRUKER 公司 VECTOR22/N 型)[13-14]。

淀粉糊化特性(RVA)采用 PERTEN Newport Scientific 仪器公司生产的 Tech-master 型粘度速测仪,用 TCW 配套软件进行分析,测定参照唐忠厚等[15]的方法;粘滞性值用厘泊(CP)表示;RVA 谱特征除用最高粘度(PKV)、最低粘度(HPV)和最终粘度(CPV)描述外,还用崩解值(BDV = PKV - HPV)、回复值(CSV = CPV - HPV)、糊化温度(PT)等来表示。

1.3　数据分析

测定结果以均值计算,采用 Microsoft Excel 2003 作图,用 SPSS 13.0 进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　甘薯叶片叶绿素含量(CCI 值)和光合特性对

不同氮素供应形态的响应

2.1.1 对叶绿素含量与光合速率的影响　甘薯在不同生长期,不同形态氮素可明显提高叶片叶绿素含量(图1),移栽后30 d和50 d,N3处理叶绿素含量最高,70 d时N1含量最高,90 d时N2含量最高,表明不同生长期不同氮素供应形态在叶绿素合成过程发挥效率不同;同时,各氮素处理早期甘薯植株叶片叶绿素含量均有上升,至70 d时达最大值,随生长期延长,叶绿素含量均呈下降趋势,可能与土壤氮肥持效力有关。

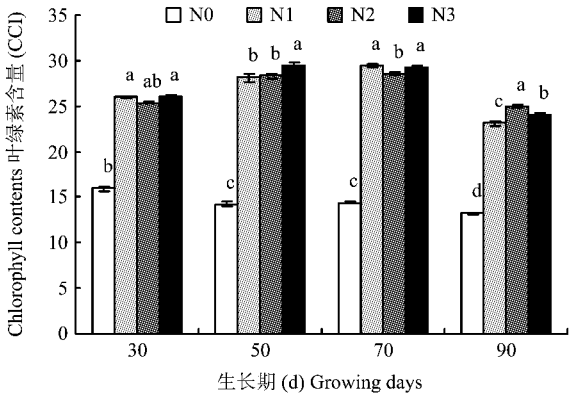

图1　不同生长期不同氮素供应形态对叶绿素含量的影响

Fig. 1　Effect of nitrogen supply forms on CCI contents in different growing days

[注(Note):数据为平均值±标准差,柱上不同字母表示处理间在5%水平差异显著 Data are mean ± standard error. Different letters above the bars represent significant differences at the 5% level.]

各处理中,不同生长期N1的光合速率都最高(图2),且与其它处理间差异达到显著水平($P < 0.05$),表明氮素供应形态不同,光合速率提升程度不同,施用铵态氮更能促进甘薯叶片的光合作用,提高光合效率,从而对后期甘薯块根膨大有一定促进作用。各处理光合速率在栽插后50 d时达最大,比叶绿素含量最大值出现提前,随后呈下降趋势,酰胺态氮下降程度明显,光合速率下降与叶片叶绿素含量有一定关联。

2.1.2 对光合有效辐射与胞间CO_2浓度的影响　光合有效辐射是植物生命活动、有机物质合成和产量形成的能量来源。由图3可知,氮素促进甘薯叶片光合有效辐射的吸收,各氮素处理与N0均有显著差异($P<0.05$);甘薯不同生长期,N1处理均高于N2、N3处理,且差异明显,而N2与N3处理间差异不明显,表明铵态氮更利于甘薯早期叶片有效辐射的吸收,有助于光合产物合成与累积,促进甘薯植株

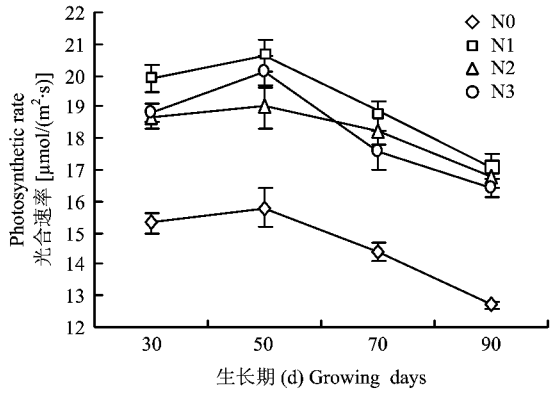

图2　不同生长期不同氮素供应形态对光合速率的影响

Fig. 2　Effect of nitrogen supply forms on photosynthetic rate in different growing days

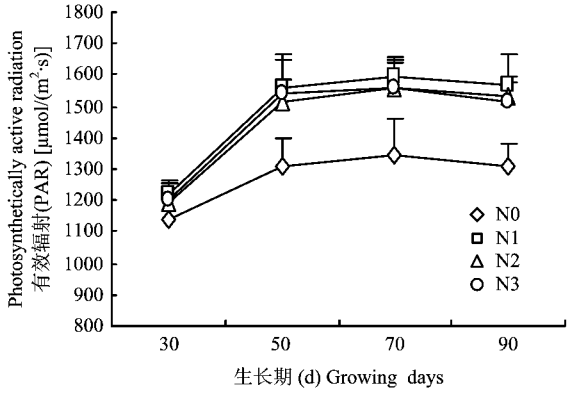

图3　不同生长期不同氮素供应形态对有效辐射的影响

Fig. 3　Effect of nitrogen supply forms on PAR in different growing days

生长发育。

胞间CO_2浓度是与光合作用密切相关的一个重要指标。由图4知,与对照N0相比,氮素处理叶片胞间CO_2浓度均明显增高,表明氮肥可不同程度提高甘薯叶片胞间CO_2浓度;N1处理在栽插后30 d与50 d时高于其它处理,差异达显著水平($P < 0.05$),表明铵态氮有利于甘薯苗期阶段生长;各处理在栽插后50 d时,胞间CO_2浓度上升达最大值,随后下降;数据显示,其数值高低在很大程度上可反映甘薯叶片光合作用的强弱。

2.1.3 对蒸腾速率与气孔导度的影响　由图5可以看出,不同生长期N0处理蒸腾速率明显低于氮处理组;不同氮素供应形态处理,甘薯植株蒸腾速率的变化不同,N1处理栽插后30 d蒸腾速率最高,为2.9 mmol/(m^2·s),50 d时明显下降,可能与铵态氮吸收特点有关;栽插后70 d内,N2处理蒸腾速率先

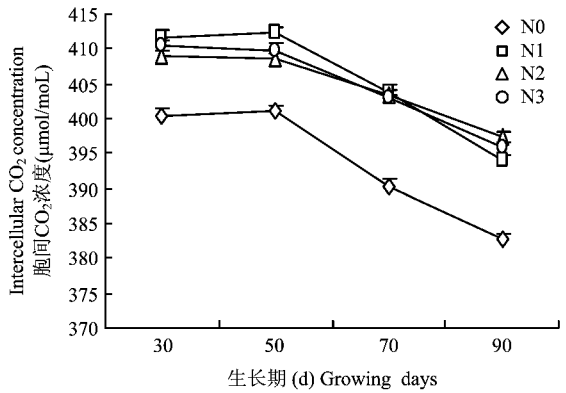

图 4　不同生长期不同氮素供应形态对胞间 CO_2 浓度的影响

Fig. 4　Effect of nitrogen supply forms on intercellular CO_2 concentration in different growing days

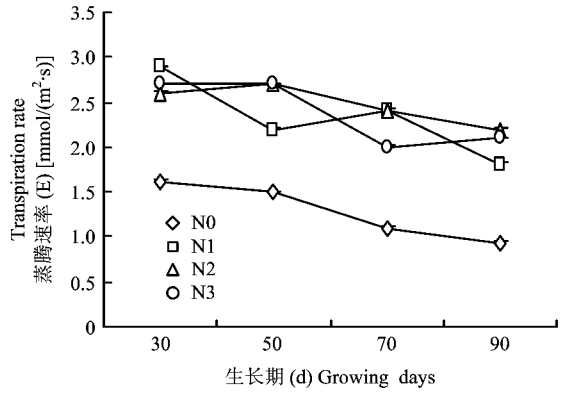

图 5　不同生长期不同氮素供应形态对蒸腾速率的影响

Fig. 5　Effect of nitrogen supply forms on transpiration rate in different growing days

小幅上升后逐渐下降;N3 处理 50 d 后,蒸腾速率明显下降,70 d 后缓慢上升;栽插后 30 d 和 50 d,N2 与 N3 处理间蒸腾速率差异不明显,N2 与 N1 间差异达显著水平($P<0.05$),70 d 时,N1 与 N2 处理间蒸腾速率差异不明显($P>0.05$),N1 与 N3 的差异达显著水平($P<0.05$),90 d 时,N1 与 N2 处理间蒸腾速率差异达显著水平($P<0.05$)。

图 6 显示,对照 N0 处理,不同形态氮素促进甘薯植株叶片气孔导度提升,随生长期延长叶片气孔导度显著下降,不同氮素形态处理间气孔导度差异不显著。

2.2　甘薯块根干率、产量和主要品质指标对不同氮素供应形态的响应

块根干率是衡量甘薯块根性状的重要指标之一,反映块根干物质量的高低。数据分析显示(见表 1),与对照 N0 相比,氮素处理块根干率均值增加 23.83%,达到显著水平($P<0.05$),适量的不同形态氮素促进徐薯 18 块根干物质的合成与累积程度不一,N3 处理最高,达 29.05%,N1 与 N2、N3 间有差异,但不显著($P>0.05$)。

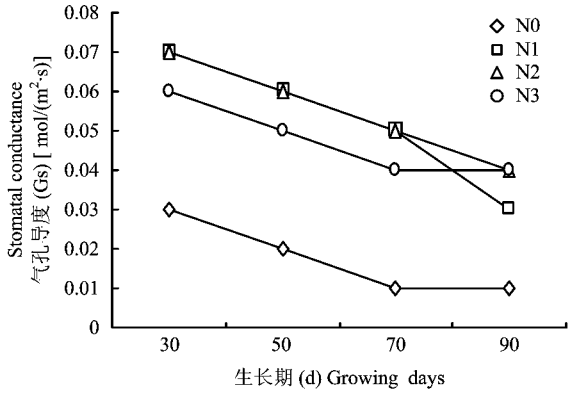

图 6　不同生长期不同氮素供应形态对气孔导度的影响

Fig. 6　Effect of nitrogen supply forms on stomatal conductance in different growing days

氮肥影响甘薯早期植株的生长,影响光合产物的合成、代谢与转运,对甘薯膨大期产量形成至关重要。数据显示,不同氮素供应形态均显著提高甘薯块根产量,N1 处理获得最高单株块根重,达 1.57 kg/plant,比 N2 与 N3 分别增产了 10.6% 和 17.2%,各处理间差异达显著水平($P<0.05$),表明适量铵态氮下光合特性与块根产量的形成呈一定正相关性,促进甘薯早期植株的生长,有利于甘薯块根产量的增加。

品质分析数据显示,与对照 N0 相比,N1、N2 和 N3 处理下甘薯块根淀粉率分别提高 15.30%、12.09% 与 10.47%,表明氮素提高甘薯块根淀粉率,有利于淀粉积累;不同氮素供应形态处理间淀粉率有差异,但不显著($P>0.05$)。氮素是合成蛋白质的重要元素,结果表明,氮素显著促进甘薯块根蛋白质的合成与累积,不同氮素供应形态处理间差异达显著水平($P<0.05$),铵态氮处理蛋白质含量最高,酰胺态氮处理最低。

甘薯块根富含碳水化合物,糖类占有相当比例。表 1 显示,徐薯 18 块根在 N0 处理下获最高可溶性糖和还原糖含量,与各氮素处理下差异达显著水平($P<0.05$),可能原因是在氮素缺乏下,块根碳、氮代谢受阻,碳水化合物代谢与合成获得更多空间;各氮素处理间,块根可溶性糖含量和还原糖含量有一定差异, N3 与 N1、N2 间可溶性糖含量差异达显著

表1 不同氮素供应形态处理下甘薯块根干率、产量和主要品质指标差异

Table 1 Difference of storage root dry matter rate, yield and quality under the nitrogen supply forms

处理 Treatment	干率(%) Dry matter rate	产量(kg/plant) Yield	淀粉率(%) Starch	蛋白质(%) Protein	可溶性糖(%) Soluble sugar	还原糖(%) Reducing sugar
N0	23.14 ±0.82 c	0.64 ±0.078 d	54.52 ±1.6 b	2.92 ±0.52 d	16.78 ±0.89 a	6.35 ±0.39 a
N1	28.71 ±0.67 ab	1.57 ±0.11 a	62.87 ±0.52 a	6.86 ±0.09 a	13.18 ±0.15 c	5.01 ±0.14 c
N2	28.20 ±0.12 b	1.34 ±0.16 c	61.11 ±0.88 a	6.01 ±0.27 b	12.80 ±0.13 c	5.27 ±0.18 b
N3	29.05 ±0.08 a	1.42 ±0.12 b	60.23 ±0.67 a	5.50 ±0.22 c	14.33 ±0.26 b	5.44 ±0.21 b

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

水平($P<0.05$),N1与N2、N3间还原糖含量差异达显著水平($P<0.05$)。

2.3 甘薯块根淀粉糊化特性(RVA)对不同氮素供应形态的响应

糊化特性是评价甘薯块根淀粉物理特征的重要参数[15],主要表现在最高粘度值(PKV)、最低粘度值(HPV)、最终粘度值(CPV)的大小和糊化温度(PT)的高低。由表2可知,不同处理间甘薯淀粉RVA特征谱有一定差异,甘薯淀粉糊化特性值受外源氮因素的影响,且变化复杂;PKV、HPV、CPV、BDV(崩解值)、CSV(回复值)和PT变异系数分别为1.1%、4.2%、3.0%、4.3%、1.1%和0.39%,显示氮形态对HPV、CPV和BDV影响较大,而对糊化温度PT影响甚微;N1处理下PKV、BDV和CSV最高,PT最低,N2处理下HPV和CPV最高,CSV和BDV最低,N3处理下PKV、HPV和CPV最低。结果表明,铵态氮(N1)在一定程度上可提高淀粉PKV、BDV和CSV,硝态氮(N2)可提高HPV和CPV。

表2 不同氮素供应形态处理下甘薯块根淀粉糊化特性差异

Table 2 Differences of root starch pasting properties under the nitrogen supply forms

处理 Treatment	最高粘度(cp) PKV	最低粘度(cp) HPV	最终粘度(cp) CPV	崩解值(cp) BDV	回复值(cp) CSV	糊化温度(℃) PT
N0	5526 ±41 b	2540 ±65 c	3466 ±30 c	2986 ±50 c	926 ±44 a	75.4 ±0.1 a
N1	6197 ±67 a	2842 ±36 b	3780 ±49 b	3355 ±51 a	938 ±39 a	74.6 ±0.1 ab
N2	6110 ±50 ab	3029 ±45 a	3947 ±38 a	3081 ±47 b	918 ±40 ab	75.1 ±0.1 a
N3	6067 ±25 ab	2799 ±36 b	3731 ±33 b	3268 ±29 ab	932 ±35 a	75.1 ±0.0 a

注(Note): PKV—Peak viscosity; HPV—Through viscosity; CPV—Final viscosity; BDV—Breakdown; CSV—Consistence. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

3 讨论与结论

在甘薯种植和生产过程中,氮肥是影响甘薯植株生长、产量和品质形成的重要营养因子,也是田间施用量最多的肥料;目前氮肥在甘薯上的应用研究多侧重于大田条件下施氮水平和施氮时期[16-19]。大田条件下的开放环境以及多种因素的综合,研究结果比较符合农田生产实践,但存在可能的不确定或未知因素对结果的干扰,也是许多研究者应考虑的因素,尤其甘薯作为营养生长作物,大田环境下易造成试验结果重复间差异大,或因甘薯地上部旺长,会导致减产、病虫害加重和品质的降低[20];从经济、生态与精确角度,选择可控的小环境,研究氮肥的应用与代谢,便于科学认识氮素在甘薯高产、优质和高效生产中的价值,对于大田精准施肥、增产调优具有一定指导意义。

氮是叶绿素合成的重要元素,直接影响植株叶片光合作用强弱;前人在研究氮供应形态对作物叶绿素合成的影响上结果不尽相同,邱永祥等[21]研究认为施用硝态氮处理叶菜用甘薯,其叶绿素a含量

极显著高于施用铵态氮处理;肖凯等[22]研究表明,在盆栽条件下以铵、硝态氮配施处理的小麦叶片的叶绿素含量高,硝态氮处理次之,铵态氮处理最低;戴廷波等[23]、郭培国等[10]研究认为,配施铵态氮与酰胺态氮有利于叶绿素合成。本研究显示,在不同生长期氮供应形态在甘薯叶绿素合成上发挥效率不同,铵态氮更有利于叶片叶绿素合成。

在光合特性方面,前人研究认为,硝态氮营养下小麦叶片光合速率高于铵态氮[22-23];邱永祥等[20]认为硝态氮对促进甘薯植株光合速率作用较铵态氮明显;张伟等[9]研究认为马铃薯不施肥蒸腾速率最高,铵态氮最低。本研究表明,施用铵态氮易促进甘薯叶片的光合作用,不同生长期铵态氮的光合速率与有效辐射都最高,与其它处理相比差异均达到显著水平($P<0.05$);胞间 CO_2 浓度铵态氮处理在移栽后 30 d、50 d 时期高于其它处理,差异达显著水平($P<0.05$);移栽后 30 d 铵态氮的蒸腾速率最高,50 d 后明显下降,90 d 时,酰胺态氮的蒸腾速率为最大;可能是受材料、氮肥量、栽培方式或水分等因素的影响,而对氮形态的偏好不同,这与前人研究结果不完全一致。

铵态氮具有阳离子特点,易吸附于甘薯根系被直接吸收,有利于提高氮素利用效率[12];同时,铵态氮有利于甘薯植株早期生长,与甘薯膨大期产量的形成有重要关系。本研究显示,在盆栽条件下不同形态氮素能显著提高甘薯块根产量,铵态氮处理与对照相比,增产率高于硝态氮和酰胺态氮处理,这与史春余等[12]的大田试验研究结果一致,表明适量铵态氮更能促进甘薯块根产量的提高。而在小麦研究上,多数认为铵态氮与硝态氮混合施用增产效果更佳[3-7];也有在洋葱上的研究认为,硝态氮和铵态氮搭配使用,降低了地上部鲜重和干重[24],该观点可为进一步研究氮素形态对甘薯生长和产量的影响提供借鉴。

氮素对品质的影响可能主要取决于块根碳氮代谢及其相关酶活性,在一定程度可改良甘薯块根品质[19-20]。本研究表明,不同处理下,甘薯块根品质差异明显,铵态氮处理下甘薯块根淀粉率和蛋白质含量高,酰胺态氮处理低;酰胺态氮获得较高的可溶性糖含量和还原糖含量。因此,可针对不同类型甘薯和不同用途考虑用不同氮素形态供应来调控品质,如施铵态氮提高甘薯淀粉含量,施用酰胺态氮肥提高糖含量,对某些喜硝态氮的植物,通过铵态氮和硝态氮按一定比例配施,通过降低植物体内的硝酸盐含量达到改良品质等。

有研究认为决定甘薯淀粉糊化特性的关键因素是基因型,而非施肥措施[25]。Kitahara 等[26]对含不同直链淀粉的基因型的淀粉糊化特性和支链淀粉链长分布作了研究,发现支链淀粉的差异对糊化特性影响更大;Noda 等[27]研究了两种不同施肥水平对甘薯淀粉特性的影响,发现作用很小;也有研究认为 RVA 谱特征与食味品质的主要指标有显著相关性,崩解值、回复值对于评价食味品质优劣有较强的准确性,最高粘度值、崩解值高有利于食味品质改良[28]。本研究表明,甘薯淀粉糊化特性值一定程度受氮素影响,且变化复杂;铵态氮可促进淀粉 PKV 和 BDV 上升,有利于甘薯块根淀粉品质的改良。故认为,合理使用不同形态氮素可成为除施氮量和施用时期之外调控甘薯植株生长发育、块根产量和品质的又一重要途径。有文献[29]报道,铵态氮作为氮源有许多潜在的益处,但过量施用铵态氮易造成作物的"铵中毒",甘薯作物是否具同样效应未见报道。应当指出,本试验仅选我国著名甘薯品种徐薯 18 为材料,未设置不同氮素供应形态的配比与大田试验对照,试验结果是否广泛适用于不同的品种类型和生态环境,还有待于进一步研究与评价。

参 考 文 献:

[1] 马代夫, 李强, 曹清河, 等. 中国甘薯产业及产业技术的发展与展望[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5): 969-973.
Ma D F, Li Q, Cao Q H *et al*. Development and prospect of sweetpotato industry and its technologies in China[J]. Jiangsu J. Agric. Sci, 2012, 28(5): 969-973.

[2] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1994. 17-25.
Lu J L. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1994. 17-25.

[3] Wang X T, Below F E. Cytokinins in enhanced growth and tillering of wheat induced by mixed nitrogen source[J]. Crop Sci., 1996, 36: 121-126.

[4] Cramer M D, Lewis O A M. The influence of NO_3^- and NH_4^+ nutrition on the gas exchange characteristics of the roots of wheat and maize plants[J]. Ann. Bot., 1993, 72: 37-46.

[5] 马新明, 王志强, 王小纯, 等. 不同形态氮肥对不同专用小麦叶片氮代谢及子粒蛋白质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1076-1080.
Ma X M, Wang Z Q, Wang X C *et al*. Effects of different types of nitrogen fertilizer on leaves N - metabolism and grain protein of wheat cultivars with specialized end-uses[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(7): 1076-1080.

[6] 马宗斌, 何建国, 王小纯, 等. 氮素形态对两个小麦品种子粒内源激素含量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 63

-69.
Ma Z B, He J G, Wang X C *et al*. Effects of nitrogen forms on endogenous hormones content in grains of two wheat cultivars[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(1): 63-69.

[7] 吴金芝, 黄明, 李友军, 等. 不同水分和氮素形态对弱筋小麦豫麦50子粒淀粉产量和淀粉糊化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1833-1840.
Wu J Z, Huang M, Li Y J *et al*. Effects of different water and nitrogen forms on starch yields and starch pasting properties of weak gluten wheat variety Yumai 50[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(5): 1833-1840.

[8] 李彩凤, 马凤鸣, 赵越, 等. 氮素形态对甜菜氮糖代谢关键酶活性及相关产物的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(1): 128-132.
Li C F, Ma F M, Zhao Y *et al*. Effects of nitrogen forms on key enzyme activities and related products in sugar and nitrogen metabolism of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) [J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(1): 128-132.

[9] 张伟, 高世铭, 王亚宏, 等. 不同形态氮素比对马铃薯氮素分布、光合参数及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(6): 39-43.
Zhang W, Gao S M, Wang Y H *et al*. Effects of NH_4^+/NO_3^- ratio on nitrogen distribution, photosynthetic parameter and yield of potato[J]. J. Gansu Agric. Univ., 2009, 44(6): 39-43.

[10] 郭培国, 陈建军, 郑燕玲. 氮素形态对烤烟光合特性影响的研究[J]. 植物学通报, 1999, 16(3): 262-267.
Guo P G, Chen J J, Zheng Y L. Study on the effects of nitrogen forms on photosynthetic characteristics in flue-cured tobacco[J]. Chin. Bull. Bot., 1999, 16(3): 262-267.

[11] 严君, 韩晓增, 王树起, 等. 不同形态氮素对种植大豆土壤中微生物数量及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 341-347.
Yan J, Han X Z, Wang S Q *et al*. Effect of different nitrogen forms on microbial quantity and enzymes activities in soybean field[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 341-347.

[12] 史春余, 张晓冬, 张超, 等. 甘薯对不同形态氮素的吸收与利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 389-394.
Shi C Y, Zhang X D, Zhang C *et al*. Absorption and utilization of different nitrogen forms from sweet potato[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 389-394.

[13] 马代夫, 李强, 李秀英, 等. 甘薯高胡萝卜素食用品种的亲本筛选[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 798-808.
Ma D F, Li Q, Li X Y *et al*. Selection of parents for breeding of sweetpotato food varieties of high carotene content[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(3): 798-808.

[14] 唐忠厚, 李洪民, 马代夫. 甘薯蛋白质含量近红外光谱数学模型应用研究[J]. 中国食品学报, 2008, 8(4): 169-173.
Tang Z H, Li H M, Ma D F. Studies on the application of analysis model for protein content in sweetpotato by near infrared reflectance spectroscopy(NIRS)[J]. J. Chin. Instit. Food Sci. Tech., 2008, 8(4): 169-173.

[15] 唐忠厚, 李洪民, 张爱君, 等. 磷素对甘薯主要品质性状与RVA特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 391-396.
Tang Z H, Li H M, Zhang A J *et al*. Effect of phosphorus on quality and RVA profile characters in sweetpotato[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(2): 391-396.

[16] Hammet L K. The influence of nitrogen kinds, nitrogen rate and potassium rate on sweet potato production and the mineral content [J]. Am. Soc. Hort. Sci. 1984, 109(3): 294-298.

[17] Bourke R M. Influence of nitrogen and potassium fertilizer on growth of sweet potato(*Ipomoea batatas*) in Papua New Guinea [J]. Field Crops Res., 1985, 12: 363-375.

[18] Mukhtar A A, Tanimu B, Arunah U L *et al*. Evaluation of the agronomic characters of sweet potato varieties grown at varying levels of organic and inorganic fertilizer[J]. Int. J. Organ. Agric. Res. Dev., 2010, 1: 83-91.

[19] 陈晓光, 李洪民, 张爱君, 等. 不同氮水平下多效唑对食用型甘薯光合和淀粉积累的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(9): 1728-1733.
Chen X G, Li H M, Zhang A J *et al*. Effect of paclobutrazol under different N-application rates on photosynthesis and starch accumulation in edible sweet potato[J]. Acta Agron. Sin., 2012, 38(9): 1728-1733.

[20] 江苏农业科学院, 山东农业科学院. 中国甘薯栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版, 1984.
Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Shandong Academy of Agricultural Sciences. Sweet potato cultivation in China[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984.

[21] 邱永祥, 谢小珍, 蔡南通, 等. 不同氮素及硝化抑制剂对叶菜用甘薯光合特性、茎叶产量及硝酸盐含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(12): 58-64.
Qiu Y X, Xie X Z, Cai N T *et al*. Studies on the effects of different fertilizers and nitrification inhibitor on photosynthetic and vine yield and nitrate accumulation in vine-vegetable sweet potato[J]. J. Northwest Sci-Tech. Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.), 2006, 34(12): 58-64.

[22] 肖凯, 张荣铣. 氮素营养对小麦群体光合碳同化作用的影响及共调控机制[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 235-243.
Xiao K, Zhang R X. The effect and regulating mechanism of nitrogen nutrition on canopy photosynthetic carbon assimilation in wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(3): 235-243.

[23] 戴廷波, 曹卫星, 荆奇. 氮形态对不同小麦基因型氮素吸收和光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 849-852.
Dai T B, Cao W X, Jing Q. Effects of nitrogen forms on nitrogen absorption and photosynthesis of different wheat genotypes[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 12(6): 849-852.

[24] Inal A, Tarakcioglu C. Effects of nitrogen forms on growth, nitrate accumulation, membrane permeability and nitrogen use efficiency of hydroponically grown bunch onion under boron deficiency and toxicity[J]. J. Plant Nutr., 2001, 24(10): 1521-1534.

[25] 陆国权, 唐忠厚, 黄华宏. 不同施钾水平甘薯直链淀粉含量和糊化特性的基因型差异[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(5): 280-283.
Lu G Q, Tang Z H, Huang H H. Genotype variation in amylose content and starch pasting properties of sweet potato storage at two K levels[J]. Acta Agric. Zhejiangensis, 2005, 17(5): 280-283.

[26] Kitahara K, Ooi Y, Mizukami Set. Physicochemical properties of starches from sweet potato cultivars[J]. J. App. Glycosci., 1996, 43(1): 59-66.

[27] Noda T, Takahata Y, Sato T. Physicochemical properties of starches from purple and orange fleshed sweet potato roots at two levels of fertilizer[J]. Starch, 1996, 48: 395-399.

[28] 隋炯明, 李欣, 严松, 等. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状相关性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 657-663.
Sui J M, Li X, Yan S *et al*. Studies on the rice RVA profile characteristics and its correlation with the quality[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(4): 657-663.

[29] 吴平, 印莉萍, 张立平. 植物营养分子生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Wu P, Yin L P, Zhang L P. Molecular physiology in plant nutrition[M]. Beijing: Science Press, 2001.