

植物生长调节剂对马铃薯叶片生理代谢及产量品质的影响

赵晶晶¹, 冯乃杰¹, 郑殿峰¹, 李东¹, 张盼盼¹,
崔洪秋², 梁晓艳¹, 于奇¹

(1. 黑龙江八一农垦大学农学系化控研究室/黑龙江省高校寒地作物种质改良与栽培重点实验室, 黑龙江 大庆 163319;
2. 黑龙江省农业科学院大庆分院, 黑龙江 大庆 163316)

摘 要: 大田栽培条件下, 以马铃薯克新 13 为材料, 叶面喷施植物生长调节剂 2-N,N-二乙氨基乙基己酸酯 (Diethyl aminoethyl hexanoate, 简称 DTA-6)、缩节安 (Mepiquat chloride, 简称 DPC) 以及烯效唑 (Uniconazole, 简称 S3307), 研究植物生长调节剂对马铃薯叶片生理代谢及产量、品质形成的影响。结果表明: 在马铃薯块茎膨大期喷施植物生长调节剂, 均显著增加了单薯重、淀粉产量和鲜薯产量, 其中, 以 DTA-6 调控效果为最佳, 单薯重、淀粉产量、鲜薯产量和淀粉含量比 CK 分别增加了 10.40%、40.26%、26.56% 和 11.32%, 块茎还原糖含量比 CK 降低了 20%。此外, 调节剂处理均提高了马铃薯叶片叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率和细胞间隙 CO₂ 浓度, 加快了叶片的光合作用, 各指标与产量之间呈正相关。随着时间的推移, 各处理的叶片淀粉和蔗糖含量呈先降低后升高的变化趋势, 淀粉酶活性呈降低的变化趋势, 调节剂对叶片蔗糖转化酶活性的调控效果呈不同规律的变化。总体而言, 调节剂均提高了马铃薯产量, 改善了块茎品质, 其中 DTA-6 处理效果最佳。

关键词: 植物生长调节剂; 马铃薯; 叶片; 生理代谢; 产量; 品质
中图分类号: S482.8; S532 **文献标志码:** A

Effects of plant growth regulators on leaf physiology, yield and quality of potato

ZHAO Jing-jing¹, FENG Nai-jie¹, ZHENG Dian-feng¹, LI Dong¹, ZHANG Pan-pan¹,
CUI Hong-qiu², LIANG Xiao-yan¹, YU Qi¹

(1. The Chemical Control Room College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Germplasm Improvement and Cultivation in Cold Regions of Heilongjiang, Daqing, Heilongjiang 163319, China;
2. Daqing Branch College, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing, Heilongjiang 163316, China)

Abstract: Field experiment with potato Kexin-13 as material was conducted, and spraying of three chemical regulators, 2-N,N-diethylamino ethylcaproate (DTA-6), mepiquat chloride (DPC) and uniconazole (S3307) were performed. The results showed that PGRs significantly increased per tuber weight, starch yield and fresh yield. Among them, DTA-6 treatment showed positive effect, with the weight of tuber, the yield of starch, the yield of fresh potato and the content of starch increased by 10.40%, 40.26%, 26.56% and 11.32%, respectively, whereas the content of reducing sugar reduced by 20%. In addition, PGRs enhanced chlorophyll content, net photosynthetic rate, transpiration rate and intercellular CO₂ concentration, thus having higher photosynthetic activity. Photosynthetic index was positively correlated with yield. The starch and sucrose content showed downward and upward trend, and the amylase activity decreasing trend. The invertase activity showed different pattern. Our findings indicated that PGRs increased yield and improved quality, and DTA-6 treatment is recommended.

Keywords: plant growth regulators (PGRs); potato; leaf; physiological metabolism; yield; quality

收稿日期: 2016-06-12 修回日期: 2017-10-12
基金项目: 黑龙江农垦总局全国基层农技推广补助项目 (HKKKJSF-07); 黑龙江农垦总局科技攻关项目 (HNK2D10A-05-10; HNK12A-06-03); 黑龙江省教育厅产前培育项目 (1254CGZH29); 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目 (YJSCX2015-Y08)
作者简介: 赵晶晶 (1991—), 女, 黑龙江大庆人, 博士, 主要从事作物化学调控技术与原理。E-mail: nl140828@163.com。
通信作者: 冯乃杰 (1970—), 女, 河北宝坻人, 教授, 主要从事作物化学调控。E-mail: byndfnj@126.com。

植物生长调节剂(Plant Growth Regulators, 简称 PGRs)在调控植物碳水化合物运输与分配等方面具有重要的作用^[1]。叶片是植物进行光合作用的场所,也是植物合成有机物和获得能量的根本来源,光合产物以淀粉的形式暂时储存在叶片中,经淀粉酶水解成蔗糖后由韧皮部运输到块茎中。Poling 等^[1]研究发现,植物生长调节剂(简称 PGRs)在调控植物碳水化合物的运输与分配等方面具有重要的作用,如调节剂胺鲜酯(简称 DTA-6)具有生长素、赤霉素及细胞分裂素的多种功能,通过增强植物光合作用和植物酶活性(如蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶等),促进细胞分裂和伸长以及植物碳代谢等^[2],叶面喷施 DTA-6 能提高叶片的净光合速率,增加叶片中蔗糖含量,短期内蔗糖浓度升高可增加同化物从叶片的输出速率^[3]。烯效唑(简称 S3307)和缩节胺(简称 DPC)均属于植物生长延缓剂,两者均可抑制顶端分生区细胞的伸长,使植物节间缩短,茎秆粗壮,叶片加厚,叶色浓绿等^[4],陈晓光等^[5]和樊维言等^[6]研究发现,植物生长延缓剂能增加叶片叶绿素含量,提高净光合速率,显著增加作物产量,改善其品质。有报道指出,在马铃薯不同时期喷施 DTA-6 和 S3307 均可提高叶片中蔗糖含量和蔗糖转化酶活性^[7],增加地下主茎淀粉酶活性以及蔗糖、淀粉、可溶性糖含量^[8]。与传统农业投入物质相比,PGRs 由于其低毒、使用浓度低、剂量小、见效快等特点而在生产上被广泛应用。

目前,关于 PGRs 对马铃薯块茎膨大期叶片的生理代谢及产量、品质形成机理的研究较少且欠缺系统性,尤其是 DPC 对马铃薯叶片生理活性的影响尚未见报道。因此,本试验选用促进型调节剂 DTA-6、延缓型调节剂 S3307 和 DPC 为供试药剂,系统研究了三种调节剂对马铃薯叶片生理代谢及产量品质形成的影响,旨在探讨 PGRs 提高马铃薯产量及改善其品质的机理,为 PGRs 在马铃薯生产上的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 年在黑龙江农垦九三管局进行。试验地土壤类型为黑钙土,地势平坦,肥力均匀,0~20 cm 耕层土壤基本状况:碱解氮含量为 266 mg·kg⁻¹,有效磷含量为 38.1 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 183 mg·kg⁻¹,有机质含量为 55.1 g·kg⁻¹,pH 值为 6.25。试验于 5 月 14 日播种,小区采用完全随机区组设计,6 垄区,垄长 8.0 m,垄距 0.9 m,垄作方式种

植。供试品种为克新 13。于块茎膨大期(7 月 23 日)进行叶面喷施调节剂,设 4 个处理:(1) 对照,喷施清水,(2) DTA-6,浓度 30 mg·L⁻¹, (3) DPC,浓度 200 mg·L⁻¹, (4) S3307,浓度 40 mg·L⁻¹,用量均为 225 L·hm⁻²,处理和对照各设 4 次重复。田间管理与常规相同,9 月 5 日进行收获。

1.2 取样方法

喷药后第 2 天开始第一次取样,以后每隔 8 d 取 1 次样,取样时每个小区选有代表性植株 6 株,取马铃薯功能叶片速冻于液氮中,再转入 -40℃ 冰箱中备用。收获后,在室内采用十字切割法割取留样块茎,测定其品质指标。

1.3 测定项目与方法

于块茎膨大期用便携式叶绿素仪分别测定各处理功能叶片的叶绿素值,采用 Li-6400 便携式光合仪(美国, Li-Cor 公司)测定功能叶片的光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和细胞间隙 CO₂ 浓度(C_i),测定时光照强度设为 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

淀粉和可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[9]测定;还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸法^[9]测定;蔗糖含量采用间苯二酚法测定^[10],蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法^[11]测定;酚类物质含量采用 Folin-酚试剂法^[11]测定。

产量测定方法:在马铃薯成熟期考种测产,各小区随机选取 2 m² 进行测产,最后根据公式计算产量和淀粉产量,产量(kg·hm⁻²) = 单株薯数 × 单薯重 × 密度/1000;淀粉产量(kg·hm⁻²) = 鲜薯产量 × 淀粉含量。

1.4 统计与分析

数据处理及作图采用 Microsoft Excel 2003 进行,采用 SPSS 19.0 对数据进行显著性检验及相关分析。

2 结果与分析

2.1 植物生长调节剂对马铃薯产量和淀粉产量的影响

从表 1 可以看出,叶面喷施 PGRs 均显著增加了单薯重、单株薯数、淀粉产量和鲜薯产量,DTA-6 调控效果最佳,其次为 S3307,DPC 处理效果较差,单薯重分别比对照增加 10.40%、5.41% 和 7.98%,淀粉产量分别比对照增加 40.26%、25.29% 和 36.63%,鲜薯产量分别比对照增加 26.56%、15.64% 和 26.12%,经方差分析可知,处理与对照之间差异均达极显著水平。调节剂处理虽增加了马铃薯的单株薯数,但处理与对照间差异不显著,其增产作用主要依靠单薯重量的增加。

表 1 植物生长调节剂对马铃薯产量和淀粉含量的影响

Table 1 Effects of plant growth regulators on yield and starch content in potato

处理 Treatment	单薯重 Weight per tuber /g	单株薯数 /(个·株 ⁻¹) Number of tuber per plant	淀粉产量 Yield of starch /(kg·hm ⁻²)	鲜薯产量 Fresh yield /(kg·hm ⁻²)
CK	76.27 ± 1.29cB	10.57 ± 0.14aA	5 345.34 ± 145.53dD	36 293.14 ± 132.57cC
DTA - 6	84.20 ± 2.98aA	12.12 ± 0.23aA	7 497.64 ± 124.41aA	45 932.96 ± 224.20aA
DPC	80.40 ± 0.99bA	11.60 ± 0.15aA	6 697.44 ± 101.31cC	41 970.98 ± 120.55bB
S3307	82.36 ± 1.59abA	12.35 ± 0.27aA	7 303.09 ± 166.58bB	45 772.87 ± 784.44aA

注:同列不同小写字母分别表示处理间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示处理间差异极显著($P < 0.01$),下同。
Note: Lowercase and capital letters indicate difference at 0.05 and 0.01 levels of probability, respectively. The same as below.

2.2 植物生长调节剂对马铃薯光合特性的影响

作物叶片的叶绿素相对含量(SPAD)、净光合速率(P_n)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)是衡量作物光合作用的重要生理指标。研究认为^[12],马铃薯盛花期是薯块膨大的关键时期,此时叶片的光合能力是影响光合产物积累和最终产量高低的重要因素。

如表 2 所示,叶面喷施调节剂后,DTA - 6、DPC、S3307 对叶片 SPAD 的调控效果分别比对照增加 11.96%、9.46%和 9.22%,处理与对照之间差异极显著。调节剂对叶片 P_n 和 T_r 的调控效果依次为 DTA - 6、S3307、DPC,处理的 P_n 比对照分别增加 39.14%、30.82%和 10.04%,处理的 T_r 比对照分别增加 43.15%、42.77%和 43.15%,处理与对照之间差异极显著。S3307 对叶片 C_i 的调控效果最佳,其次为 DPC,DTA - 6 处理效果较差,处理比对照分别增加 20.16%、12.56%和 11.78%,处理与对照之间

差异极显著。块茎膨大期,叶片的 $SPAD$ 、 P_n 、 T_r 和 C_i 数值越大,叶片产生和积累的光合产物就越多,相关分析表明(表 3), $SPAD$ 与产量呈极显著正相关, P_n 、 T_r 和 C_i 与产量呈正相关,这说明叶片 $SPAD$ 、 P_n 、 T_r 和 C_i 与产量的关系密切,这些光合特性指标可以用作判断 PGRs 对马铃薯增产调控的重要参考依据之一。

2.3 植物生长调节剂对马铃薯叶片碳代谢的影响

2.3.1 植物生长调节剂对马铃薯叶片淀粉含量的影响 淀粉是马铃薯叶片的光合终产物之一,其含量高低也反映了“源”器官的供应能力^[13]。如图 1 所示,喷药后 2 ~ 26 d,块茎正处于膨大期,需要消耗大量的光合同化产物,而当地正值降水季节,持续的阴雨天气导致叶片的光合作用减弱,致使叶片淀粉含量降低。喷药后 26 ~ 34 d,降雨量减少,较大的日温差和充足的光照使叶片的光合作用增强,叶片内淀粉含量迅速升高。喷药后第 34 天,调节剂对叶片

表 2 植物生长调节剂对马铃薯叶片光合特性的影响

Table 2 Effects of plant growth regulators on photosynthetic traits of potato leaf

处理 Treatment	叶绿素相对含量(SPAD) Chlorophyll relative content	光合速率 Photosynthetic rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate /($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
CK	20.08 ± 0.06cB	9.55 ± 0.04dD	178.57 ± 0.64cB	2.18 ± 0.09cC
DTA - 6	22.48 ± 0.27aA	13.28 ± 0.05aA	199.60 ± 0.57abA	3.12 ± 0.03aA
DPC	21.98 ± 0.29abA	10.50 ± 0.06cC	200.99 ± 0.53bAB	2.66 ± 0.03bB
S3307	21.93 ± 0.08bA	12.49 ± 0.05bB	214.56 ± 0.39aA	3.11 ± 0.02aA

表 3 马铃薯光合特性与产量之间的相关性

Table 3 Correlation of photosynthetic parameters and yield

指标 Index	叶绿素含量(SPAD) Chlorophyll relative content	光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Photosynthetic rate	胞间 CO_2 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) Intercellular CO_2 concentration	蒸腾速率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) Transpiration rate
鲜薯产量 Fresh yield	0.83 **	0.47	0.13	0.41

注:“* *”表示相关性在 0.01 水平极显著差异,下同。
Note: * *, means significant difference at the 0.01 levels; the same as below.

淀粉含量的调控效果依序为 DPC、S3307、DTA - 6,处理比对照分别降低 1.01%、5.60%和 25.04%,DPC 和 S3307 与对照之间差异不显著,DTA - 6 与对照之间差异极显著,说明此阶段调节剂处理能够加快叶片内淀粉的分解,利于产生更多的蔗糖运输到块茎中,为块茎内碳水化合物的合成奠定了基础。

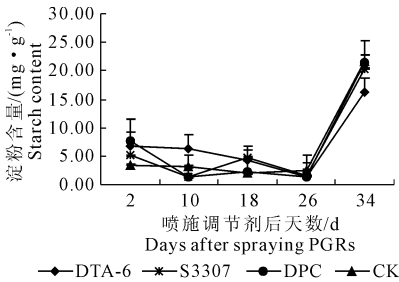


图 1 植物生长调节剂对马铃薯叶片淀粉含量的影响

Fig.1 Effects of PGRs on starch content of potato leaf

2.3.2 植物生长调节剂对马铃薯叶片蔗糖含量的影响 马铃薯叶片运输的光合产物主要以蔗糖的形式通过韧皮部运输到块茎,蔗糖含量的增加有利于提高“源”端同化物的供应能力^[14]。由图 2 分析可知,PGRs 对马铃薯叶片蔗糖含量的调控效果一致。随着喷施调节剂时间的推进,叶片蔗糖含量呈先降低后升高的变化趋势,在喷施调节剂后第 18 天下降到最低值,此时块茎正处于膨大中期,库器官的建成与发育需要源器官提供充足的能量与碳骨架,故此时叶片内的蔗糖含量降低有利于块茎的膨大,经方差分析可知,S3307 和 DTA - 6 与对照之间差异显著,DPC 与对照之间差异极显著。喷药后第 34 天,S3307 对叶片蔗糖含量的调控效果最佳,DPC 次之,DTA - 6 较差,处理比对照分别增加 56.51%、44.07%和 38.95%,处理与对照之间差异极显著,说明此阶段调节剂处理能够增加叶片内蔗糖含量的积累,提高“源”端同化物的供应能力,为块茎膨大和淀粉积累提供了充足的“碳”源。

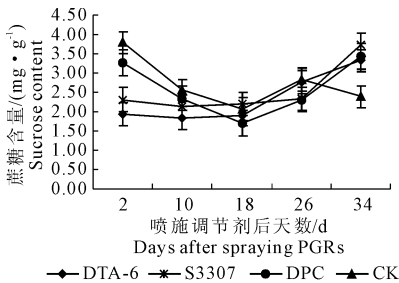


图 2 植物生长调节剂对马铃薯叶片蔗糖含量的影响

Fig.2 Effects of PGRs on sucrose content of potato leaf

2.4 植物生长调节剂对马铃薯叶片碳代谢相关酶活性的影响

2.4.1 植物生长调节剂对马铃薯叶片淀粉酶活性的影响 淀粉酶主要包括 α -淀粉酶和 β -淀粉酶,其对调节和平衡碳水化合物的形态起重要作用,在一定程度上可加快淀粉的分解^[15]。从图 3 分析可知,处理与对照的淀粉酶活性均呈缓慢下降的变化趋势。喷药后第 10 天,DTA - 6 处理效果最佳,S3307 次之,DPC 较差,处理比对照分别增加 58.45%、45.89%和 39.79%,方差分析可知,DTA - 6 和 S3307 与对照之间差异均达极显著水平,DPC 与对照之间差异达显著水平,说明此阶段调节剂能够加快叶片内淀粉的分解,产生更多的蔗糖运输到块茎中,进而促进块茎的膨大和淀粉的积累。

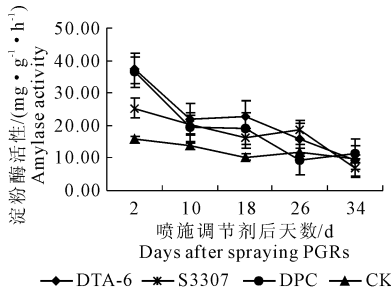


图 3 植物生长调节剂对马铃薯叶片淀粉酶活性的影响

Fig.3 Effect of PGRs on amylase activity of potato leaf

2.4.2 植物生长调节剂对马铃薯叶片蔗糖转化酶活性的影响 蔗糖转化酶是一种水解酶,能将蔗糖水解为等量的葡萄糖和果糖,而其产物已糖在植物发育和代谢中具有重要作用^[16]。PGRs 对叶片蔗糖转化酶活性的调控效果如图 4 所示。喷药后第 2 天,DTA - 6 处理提高了转化酶活性,S3307 和 DPC 降低了转化酶活性,经方差分析可知,DTA - 6 和 DPC 与对照之间差异极显著,S3307 与对照之间差异不显著。喷药后第 34 天,S3307 对叶片转化酶活性的调控效果最佳,DPC 次之,DTA - 6 处理效果较差,处理比对照分别增加 28.68%、25.15%和 6.18%,方差分析可知,处理与对照之间差异极显著,转化酶活性的高低影响叶片蔗糖输出量的多少,调节剂提高后期叶片转化酶活性有利于块茎发育。

2.5 植物生长调节剂对马铃薯块茎品质的影响

淀粉、蛋白质、还原糖、可溶性糖和酚类物质均储藏在蔬菜的可食用部分,是决定块茎营养品质的重要指标^[17]。叶面喷施 PGRs 对马铃薯块茎品质的调控效果如表 4 所示。调节剂对块茎淀粉和可溶性糖含量的调控效果以 DTA - 6 为最佳,DPC 次之,S3307 调控效果较差,淀粉含量分别比对照增加

11.32%、8.87%和 8.87%,处理与对照之间差异显著;就块茎内蛋白质含量而言,S3307 处理的效果最佳,DPC 次之,DTA-6 较差,调节剂对块茎内淀粉和蛋白质含量的调控效果相反。此外,DTA-6 处理的

还原糖含量比对照降低 20%,DTA-6 与对照之间差异极显著,用于食品加工的马铃薯特别是煎炸食品,要求还原糖含量低于 0.50%,说明 DTA-6 更有利于块茎品质的改善。

表 4 植物生长调节剂对马铃薯块茎品质的影响
Table 4 Effects of plant growth regulators on quality in potato tuber

处理 Treatment	淀粉/% Starch	蛋白质/% Protein	还原糖/% Reducing sugar	可溶性糖/% Soluble sugar	酚类物质/% Phenolics
CK	14.66 ± 0.20bB	1.86 ± 0.03bB	0.50 ± 0.02bB	1.99 ± 0.05bB	4.04 ± 0.03dC
DTA-6	16.32 ± 0.30aA	2.04 ± 0.01aA	0.40 ± 0.01cC	3.84 ± 0.02aA	5.16 ± 0.01aA
DPC	15.96 ± 0.12aA	2.06 ± 0.01aA	0.72 ± 0.01aA	1.34 ± 0.02cC	4.41 ± 0.03bB
S3307	15.96 ± 0.12aA	2.08 ± 0.00aA	0.78 ± 0.02aA	1.34 ± 0.02cC	4.31 ± 0.03cB

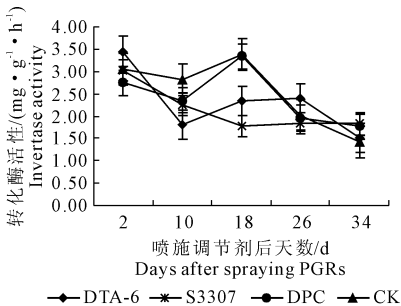


图 4 植物生长调节剂对马铃薯叶片转化酶活性的影响
Fig.4 Effect of PGRs on invertase activity of potato leaf

3 讨论

3.1 植物生长调节剂对马铃薯叶片光合特性及产量的影响

光合作用是植物有机物质合成、能量贮存与转化的基础,王惠群等^[18]认为调节剂可促进植株光合色素含量的增加,从而使 P_n 提高,但调节剂浓度过高则会抑制植株叶片的生长,降低其 P_n 。本试验中,叶面喷施 PGRs 后,就叶片 $SPAD$ 、 P_n 、 Tr 以及单薯重、淀粉产量和鲜薯产量而言,DTA-6 处理效果最佳,其次为 S3307,DPC 效果较差,块茎膨大的一个重要指标是同化物的累积,这种累积与光合作用关系密切,且反映了光合产物即碳水化合物的累积特征,通过相关分析可知,马铃薯产量与叶片 $SPAD$ 呈极显著正相关,与 P_n 、 Tr 和 C_i 呈正相关,这说明叶片 $SPAD$ 、 P_n 、 Tr 和 C_i 与产量的关系密切,推断这可能是调节剂能够使马铃薯增产的原因之一。

3.2 植物生长调节剂对马铃薯叶片碳代谢的影响

叶片中的蔗糖和淀粉是植物体内主要的碳水化合物,在植株代谢过程中起着重要的作用。有研究表明,叶面喷施调节剂在一定程度上可提高马铃薯叶片中淀粉酶活性,调控地下主茎的蔗糖和淀粉含

量^[8]。宋春艳等^[19]认为 PGRs 可提高大豆叶片的蔗糖、总糖和淀粉含量,改善叶片中碳代谢相关生理指标。蔗糖是主要的光合产物,任何导致光合能力升高的措施都会引起“源”端蔗糖供给量的上升^[20],调节剂加快蔗糖的积累和分配可以促进库器官内碳水化合物的合成。本研究可以看出,叶面喷施 PGRs 后第 2 天和 18 天,调节剂处理的淀粉含量均显著高于对照,说明块茎膨大期喷施 PGRs,提高了“源”端碳同化物的供应能力,为块茎的膨大和淀粉的积累提供了物质保障。喷施 PGRs 后 18~34 d,处理的蔗糖含量一直处于上升阶段,喷药后第 34 天,调节剂均显著提高叶片蔗糖含量,本研究结果与以往研究相一致^[7,19]。随着生育进程的推进,叶片淀粉含量与淀粉酶活性呈极显著负相关($r = -0.31^{**}$),这说明淀粉酶促进了叶片中淀粉的降解,为块茎膨大和淀粉积累提供了充足的“碳”源和能量,推断这可能是调节剂增产和改善品质的另一重要因素。

4 结论

综上所述,在马铃薯块茎膨大期喷施 PGRs 后,各调节剂均显著增加了单薯重、淀粉产量和鲜薯产量,其中,DTA-6 的调控效果最佳,与 CK 单薯重、淀粉产量和鲜薯产量相比分别增加了 10.40%、40.26%和 26.56%;叶面喷施 PGRs 对马铃薯块茎品质的调控效果以 DTA-6 为最佳,淀粉含量比对照增加了 11.32%,还原糖含量比对照降低了 20%。调节剂处理的 $SPAD$ 、 P_n 、 Tr 和 C_i 均显著高于对照, $SPAD$ 与产量呈极显著正相关, P_n 、 Tr 和 C_i 与产量呈正相关。喷药后第 34 天,各调节剂均降低了叶片淀粉含量,增加了叶片蔗糖含量,提高了叶片转化酶活性。从而可以看出,三类调节剂均促进了马铃薯叶片生理代谢,延长了叶片的功能期,最终实现了产量的提高和品质的改善。

[41] 张福锁. 氮肥提供转换了国人 56% 的蛋白质, 却又产生了全国 8% 的温室气体——低碳农业成败在“氮”[EB/OL]. http://www. stdaily. com/kjrb/content/2012 - 05/12/content _ 466842. htm.

[42] Feath P, Greenhalgh S. Policy synergies between nutrient over-enrichment and climate change[J]. *Estuaries*, 2002, 35(4): 869-877.

[43] 马文奇, Sisák István. 施肥量剧减会造成作物大幅度减产吗?[J]. *生态环境*, 2008, 17(3): 1296-1301.

[44] 廖义善, 卓慕宁, 李定强, 等. 适当化肥配施有机肥减少稻田氮磷损失及提高产量[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(S1): 210-217.

[45] 娄 庭, 龙怀玉, 杨丽娟, 等. 在过量施氮农田中减氮和有机无机配施对土壤质量及作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(2): 11-15, 17.

[46] 张文学. 我国磷资源开发利用及趋势[J]. *武汉工程大学学报*, 2011, 33(2): 1-5.

[47] 张卫峰, 马文奇, 张福锁, 等. 中国、美国、摩洛哥磷矿资源优势及开发战略比较分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 378-386.

[48] van Bochove E, Thériault G, Dechmi F, et al. Indicator of risk of water contamination by phosphorus: Temporal trends for the Province of Quebec from 1981 to 2001[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2007, 87(2): 121-128.

[49] 朱兆良, 孙 波, 杨林章, 等. 我国农业面源污染的控制政策和措施[J]. *科技导报*, 2005, 23(4): 47-51.

[50] 李维平, 管 薇, 侯淑敏, 等. 陕西黄河湿地渔业生态环境监测与保护[J]. *湿地科学与管理*, 2011, 7(3): 19-22.

[51] 王激情, 马文奇, 江荣凤, 等. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. *资源科学*, 2008, 30(3): 415-422.

[52] 张福锁. 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.

[53] 张卫峰, 马文奇, 王雁峰, 等. 中国农户小麦施肥水平和效应的评价[J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1049-1055.

[54] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 197-204.

[55] 郭志平. 增施钾肥对高淀粉马铃薯产量贡献的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2008, 30(2): 211-214.

[56] 李银水, 鲁剑巍, 廖 星, 等. 磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33(1): 52-56.

[57] 李银水, 鲁剑巍, 廖 星, 等. 钾肥用量对油菜产量及钾素利用效率的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33(2): 152-156.

[58] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 795-802.

[59] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1058-1065.

[60] 赵佐平, 同延安, 刘 芬, 等. 长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3091-3098.

(上接第 158 页)

参 考 文 献:

[1] Poling S M, Hsu W J, Koehn F J. Chemical regulation of carotenoid biosynthesis, Part 10: Chemical induction of β -carotene biosynthesis [J]. *Phytochemistry*, 1977, 16(5): 551-555.

[2] Poling S M, Hsu W J, Yokoyama H. Synthetic bioregulators of poly-cis carotenoid biosynthesis[J]. *Phytochemistry*, 1982, 21(3): 601-604.

[3] 赵黎明, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 植物生长调节剂对大豆叶片光合特性及糖分积累的影响[J]. *大豆科学*, 2008, 27(3): 442-446, 450.

[4] Zhao D L, Oosterhuis D M. Pix plus and mepiquat chloride effects on physiology, growth and yield of field-grown cotton[J]. *Plant Growth Regul*, 2000, 19: 415-422.

[5] 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.

[6] 棚维言, 张 涛, 黄永禄, 等. 喷施多效唑对甜高粱生长及生理特性的影响[J]. *作物杂志*, 2011, (5): 73-76.

[7] 张春娟. 植物生长调节剂对马铃薯生长发育及产品品质的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2009.

[8] 项洪涛. 三种植物生长调节剂对马铃薯碳代谢生理及产量品质的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2013.

[9] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992.

[10] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 128-129.

[11] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.

[12] 于亚军, 李 军, 贾志宽, 等. 宁南半干旱区不同施肥量下马铃薯光合特性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(5): 68-71.

[13] Geigen B P, Kolbe A, Tiessen A. Redox regulation of carbon storage and partitioning in response to light and sugars[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56: 1469-1479.

[14] Hironaka K, Ishibashi K, Hakamada K. Effect of static on sugar contents and activities of invertase, UDP-glucose pyrophosphorylase and sucrose 6-phosphate synthase in potatoes during storage[J]. *Potato Research*, 2001, 44: 33-39.

[15] Jeroen S W, Heleen F, Herman J E, et al. A limited set of starch related genes explain several interrelated traits in potato[J]. *Euphytica*, 2012, 186: 501-516.

[16] 齐红岩, 李天来, 刘海涛, 等. 番茄不同部位中糖含量和相关酶活性的研究[J]. *园艺学报*, 2005, 2: 239-243.

[17] Li L, Eckhard T, Hans - Reinhardt H, et al. Validation of candidate gene markers for marker-assisted selection of potato cultivars with improved tuber quality[J]. *Theor Appl Genet*, 2013, 126: 1039-1052.

[18] 王惠群, 萧浪涛, 李合松, 等. 矮壮素对马铃薯中薯 3 号光合特征和磷素营养的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 1143-1147.

[19] 宋春艳, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 植物生长调节剂对大豆叶片碳代谢相关生理指标的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(3): 91-95.

[20] Lemoine R. Sucrose transporters in plants: update on function and structure[J]. *Bba - Biomembranes*, 2000, 1465: 246-262.