

氮磷钾对甜菜硝酸还原酶与亚硝酸还原酶的影响

王玉波¹ 李彩凤¹ 马凤鸣¹ 杜永成¹ 刁志伟¹ 谷 维²

(1. 东北农业大学农学院,黑龙江 哈尔滨 150030;2. 黑龙江省农科院,黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:以当前甜菜生产主栽品种 KWS0143 为试材,采用“3414”试验设计,探讨了氮磷钾肥对甜菜硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性的影响,及 2 种酶活性与甜菜产、质量的关系。结果表明,在甜菜生育期间,2 种酶活性基本呈双峰曲线变化;随着施氮水平的升高,酶活性增强;磷肥与酶活性在生育中期呈显著或极显著正相关关系;硝酸还原酶活性在甜菜生育中前期、后期与产量、产糖量表现显著或极显著正相关关系,亚硝酸还原酶活性在甜菜生育中期与产量、产糖量正相关关系达到极显著水平。酶活性与含糖率则一直保持着负相关关系。

关键词:甜菜;硝酸还原酶;亚硝酸还原酶;氮代谢

EFFECT OF NPK ON NR AND NIR ACTIVITY OF SUGAR BEET

WANG Yu-bo¹ LI Cai-feng¹ MA Feng-ming¹ DU Yong-cheng¹ DIAO Zhi-wei¹ Gu Wei²

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030;

2. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086)

Abstract: The current main sugar beet KWS0143 was applied to investigate effect of NPK fertilizer on NR and NIR activity of sugar beet and discuss the relationship between enzyme activity and yield and quality of sugar beet design. Results showed that the enzyme's activity presented the two-peak curve during the sugar beet growth and development period, The enzyme activity was enhanced with the raising the level of nitrogen. Significant positive or extremely significant positive was found between phosphorous fertilizer and enzyme activity during the middle of sugar beet growth and development. NR activity was significant positive or extremely significant positive correlated with yield and sugar yield at the beginning and end of sugar beet growth and development period. The relationship between NIR activity with yield and sugar yield were extremely significant positive in the middle of sugar beet growth and development period. Enzymes' activity and sugar content were negatively correlated in all the growth and development period.

Key words: sugar beet; NR; NIR; nitrogen metabolism

植物从土壤中吸收的氮素主要是硝态氮和氨态氮,氨态氮进入植物体后可直接被结合成含氮有机物,而硝态氮在被同化成有机氮化物之前,还必须先经过一个还原过程,即硝酸还原。目前已知使硝态氮还原至氨的水平至少需要 2 种酶的参与,即硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NiR)。近年来不少研究者对 NR 做了大量细致而深入的分析工作,造成氮的无机

同化代谢研究偏重于 NR 的不平衡局面,忽略了 NiR 的控制酶作用,打破这种不平衡的局面,将 NR 和 NiR 联系起来同步研究是初级氮素同化研究的发展动态。Faure 等^[1]研究发现,在白化烟草叶片中的 NR 和 NiR 转录同时积累,当低水平的 NR 活性恢复后, NiR 的活性水平也恢复正常,并把这种表达过程中 NR 与 NiR 的相互作用称为 NR 和 NiR 的偶联调节。硝态氮是早

收稿日期:2011-02-07 接受日期:2011-05-03

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助(201133)

作者简介:王玉波(1978-),女,黑龙江哈尔滨人,讲师,研究方向为作物栽培生理。E-mail:wangyubo806@sohu.com

通讯作者:马凤鸣(1947-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,研究方向为作物栽培生理。

田作物可利用氮素的主要形式,硝酸还原酶是 NO_3^- 无机同化的限速酶, NiR 是 NO_3^- 同化的关键控制酶, 两者偶联完成 NO_3^- 的无机同化^[2]。

那种认为既然 NR 和 NiR 两者偶联, NR 又是硝酸盐同化的第一个限速酶, 就可以忽略 NiR 研究的观点是不全面的^[3]。NiR 起着承前启后的作用, 在某种意义上可以说研究 NiR 比 NR 更重要。本试验选用 N、P、K 3 种元素对甜菜不同生育时期叶片和块根的 NR 与 NiR 酶活性进行了研究, 拟找出肥料与 2 种酶活性的变化规律, 及酶活性与甜菜产量、质量的关系, 进而调控甜菜的氮代谢, 这对实现氮代谢最低耗碳条件下糖的有效积累具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤类型为黑土, 试验前测得耕层土壤中的基础肥力分别为: 有机质 $26.4\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.55\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.348\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 缓效钾 $888\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $189.2\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $28.9\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $272\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH6.47。供试甜菜品种为 KWS0143; 肥料为硝酸钙(N:13%); 重过磷酸钙(P_2O_5 :46%); 硫酸钾(K_2O :50%)。

1.2 试验设计

试验于 2010 年在东北农业大学科研实习基地进行, 采用“3414”试验设计方案, 即氮磷钾 3 因素, 4 水平, 共 14 个处理组合, 具体见表 1, 处理 1 为对照。试验采用框栽栽培, 每个处理 60 框, 按 3 次重复排列。框深 0.5m, 横截面积 0.15m^2 , 同大田生产条件下的单株营养面积, 肥料按表 1 处理用量均匀撒施距框表 20cm 的土层中。4 月 20 日播种, 定苗后每框 1 株, 按大田栽培措施管理。从 3 对真叶展开(6 月 6 日)起约每隔 15d, 在晴朗天气的上午 9:00~10:00 时取样, 每处理随机取 3 株, 叶片材料取样方法为自内向外选取完全展开的功能叶数片去叶脉剪碎混匀称量测定酶活。块根材料取后切成小片混匀, 称取一定量待测定酶活性。10 月 2 日收获, 选取 10 株长势均匀的甜菜材料进行块根产量和含糖率的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 NR 酶活力的测定 参照于海彬^[4]的方法, 分别测定内源基质条件(磷酸缓冲液中没有 KNO_3)与外源基质条件(提取 NR 的磷酸缓冲液含 $25\text{mmol L}^{-1}\text{KNO}_3$)下的甜菜叶片 NR 活力, 分别用 enNRA 和 exNRA 表示; NR 活性用 $\mu\text{g NO}_2^-/\text{mg} \cdot \text{FW} \cdot \text{min}$ 表示。

1.3.2 NiR 酶活性的测定 参照 Wray J L^[5]方法, 略有改动。NiR 活性用 $\mu\text{g NO}_2^-/\text{mg} \cdot \text{FW} \cdot \text{h}$ 表示。

1.3.3 含糖率的测定 将取样器由根颈和根头交界处沿 45° 角斜向插入根内取样, 样品置于压榨钳中压出汁液, 参照邵金旺的折光法进行测定^[6]。

表 1 试验设计与肥料用量

编号 No.	处理 Treatment	N $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	P_2O_5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	K_2O $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
1	$\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$	0	0	0
2	$\text{N}_0\text{P}_2\text{K}_2$	0	90	90
3	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_2$	60	90	90
4	$\text{N}_2\text{P}_0\text{K}_2$	120	0	90
5	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_2$	120	45	90
6	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$	120	90	90
7	$\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_2$	120	135	90
8	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_0$	120	90	0
9	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_1$	120	90	45
10	$\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_3$	120	90	135
11	$\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2$	180	90	90
12	$\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_2$	60	45	90
13	$\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_1$	60	90	45
14	$\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_1$	120	45	45

1.4 数据分析

采用 Excel 和 DPS 软件进行数据统计分析。

2 结果分析

2.1 NR 活力变化动态

从甜菜幼苗期(6 月初)开始取样测定酶活性, 内源基质条件下叶片 NR 活性变化如图 1 所示, 甜菜 enNR 活性在整个生育期间呈双峰曲线变化, 6 月上旬(苗期)出现第一个 NR 活性高峰, 此时幼苗 6 片真叶完全展开, 之后酶活性下降, 7 月初降至最低, 在 7 月下旬(叶丛形成末期或块根增长初期)出现第 2 个 NR 活性高峰, 此时期正是甜菜生长发育过程中的吸氮高峰期, 是氮代谢旺盛的一种体现, 随后 NR 活性又下降, 在 9 月中旬(糖分积累期)又出现一个微弱的峰, 原因是老叶枯死, 新叶刚刚长出, 所以 NR 活性有所升高。

外源基质条件下甜菜叶片 NRA 的变化动态与 enNRA 基本上是一致的, 在苗期活性最高; 七月下旬出现第 2 个高峰, 峰值远小于苗期。各生育时期内, 外源 NR 活性均高于内源 NR 活性, 二者的差值在苗期大于甜菜生育后期。内源基质条件下 NRA 反映的是甜菜营养生长的生物学特性, 即为甜菜叶片对氮素的真实还原速率, 而外源基质条件下的 NRA 反映的是叶片对 NO_3^-

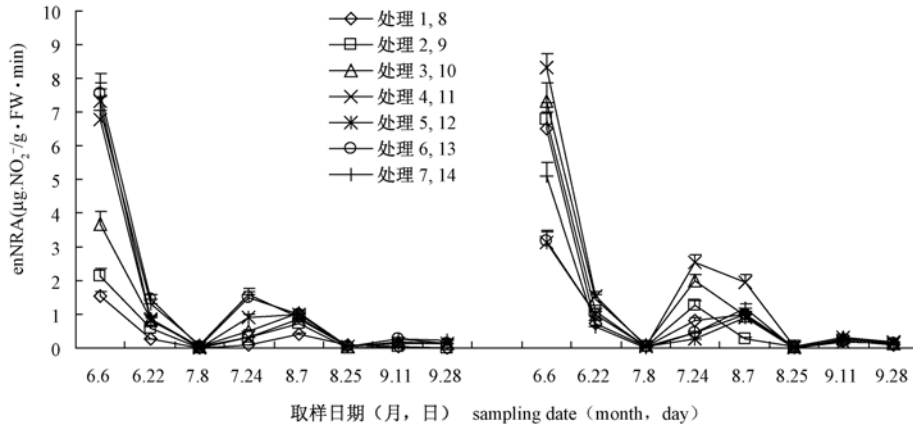


图1 不同处理水平下 enNRA 变化动态

Fig. 1 Dynamic changes of enNRA under different treatment levels

各处理编号见表1。X轴左侧图为1-7处理,右侧图为8-14处理,下图均同。

the treatments code is in table 1. Figure on the left of X axis are treatment 1-7, on the right are 8-14. And the following figures are the same as this one

的可利用强度和植株细胞代谢库中 NO_3^- 的状况,即叶片对氮素的还原潜力,实际上是间接地反映了甜菜叶片内 NR 酶量的多少^[6]。以上结果可以说明,在甜菜生育前期,NR 的还原潜力远远高于生育后期。

不同处理的甜菜叶片内,外源 NRA 在整个生育期内均表现为高-低-高-低的变化趋势(图2)。在同

一取样时期,各处理之间 NRA 差异较大,各生育时期均为高氮处理的大于低氮处理的酶活性,相同氮水平下,高磷处理的酶活性较高,钾对酶活性的影响无明显规律。较高的硝酸还原酶活性有利于 NO_3^- 的高效率转化,为 GS/GOGAT 以及其他代谢途径的顺利进行提供初动力;各取样时期,对照处理的叶片 2 种酶活性均最低。

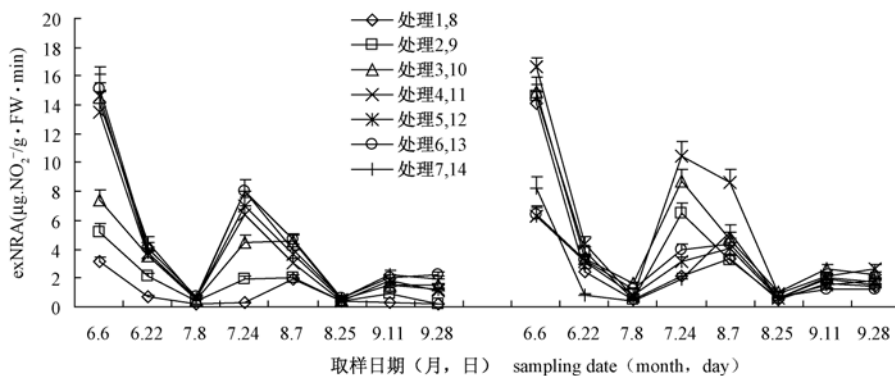


图2 不同处理水平下 exNRA 变化动态

Fig. 2 Dynamic changes of exNRA under different treatment levels

2.2 NiRA 动态变化

不同时期甜菜叶片中 NiR 活性的变化动态如图3所示,在整个生育期间甜菜 NiR 活性基本呈“M”型曲线变化,幼苗期活性较低,6月22日出现第1个 NiR 活性高峰,随后酶活开始下降,在7月份(叶丛形成期)酶活性持续最低水平,8月初 NiR 活性出现第2个高峰,峰值较第1个峰值稍有降低,随后缓慢下降,在9月下旬酶活性又稍有回升,但幅度较小。NiR 活性

变化基本上比 NR 滞后一个时期,符合甜菜体内氮代谢规律。

从图4可见,块根 NiR 酶活性在苗期最低,几乎测不到酶活性,整个生育期间呈双峰曲线变化。从苗期开始块根 NiR 酶活性逐渐升高,至块根增长初期(8月7日)出现第1个高峰,这与叶片同步变化,随后酶活性下降,至8月25日最低,在9月中旬有一个小回升。各生育时期内,块根 NiR 活性均低于叶片 NiR 活性,

二者的差值在苗期大于甜菜生育后期。在同一取样时期,各处理之间 NiRA 差异较大,各生育时期均表现为

高氮处理大于低氮处理的酶活性,对照的酶活性在各取样时期均最低。磷钾对酶活性的影响作用较小。

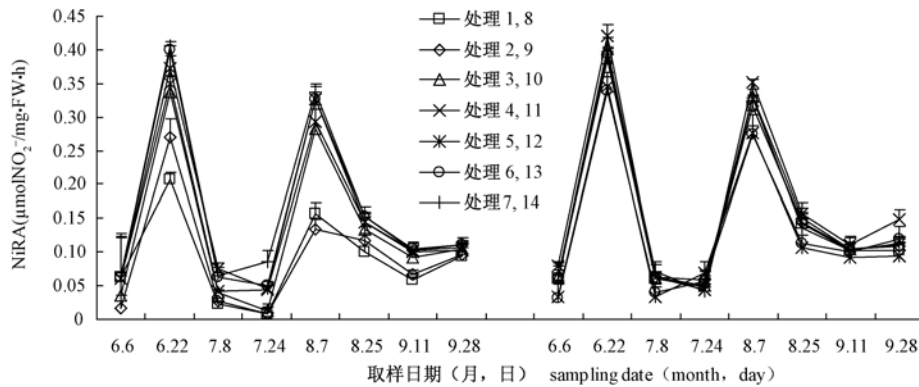


图3 甜菜叶片 NiRA 的变化动态

Fig. 3 The dynamic changes of NiRA of sugar beet leaves

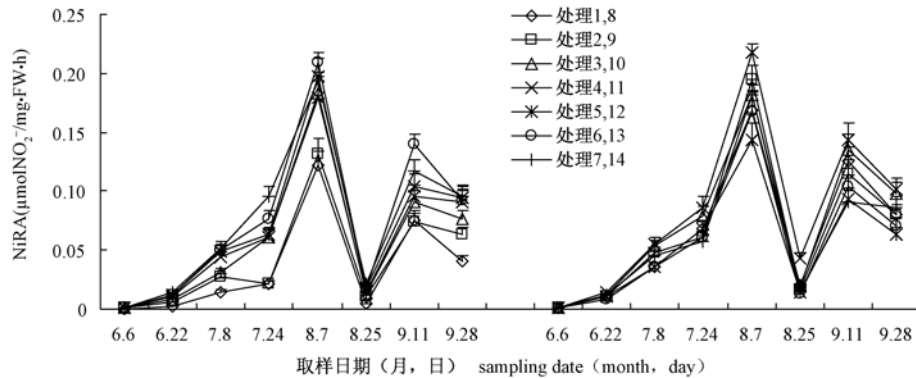


图4 甜菜块根 NiRA 的变化动态

Fig. 4 Dynamic changes of NiRA of sugar beet roots

2.3 氮磷钾与酶活性的相关分析

对氮、磷、钾水平与叶片、块根中的 2 种酶活性进行相关分析,结果见表 2。各生育时期内 NRA 与氮素处理间表现显著正相关,尤其是在酶活性变化高峰期(7月24日),酶活性与氮素水平保持着极显著相关关系,证明甜菜此时期氮代谢旺盛,不同氮素水平处理间的 NR 活性表现出随氮素水平的提高,活性增强的规律,说明甜菜叶片硝酸还原酶是一种诱导酶。磷素与 NR 酶活性在叶丛形成末期表现出极显著相关,说明磷对氮代谢有重要作用。相对于氮肥,钾肥与 NR 酶活性的相关性表现的晚。各元素与酶活性均在叶丛形成末期表现出极显著相关,证实了土壤养分与作物酶活性之间存在相互作用。

对氮、磷、钾水平与甜菜 NiR 活性的相关性分析表明,各生育时期内 NiRA 与氮素处理间一直表现正

相关,除 7 月 24 日相关性不显著外,其他时期均表现出显著或极显著相关关系。不同氮素水平处理间的 NiR 活性表现出随氮素水平的提高而增强的规律性,说明甜菜亚硝酸还原酶也受氮素的诱导,进一步证实了和 NR 的偶联作用;磷素与叶片 NiR 活力在苗期表现出极显著相关,在块根增长期和生育末期呈显著相关关系,说明磷对氮代谢有促进作用;钾肥与酶活性的关系不明显。

2.4 氮素同化关键酶与产量、含糖率及产糖量的相关分析

对甜菜不同取样时期,不同取样部位的 NR、NiR 酶活力与块根产量、含糖率及产糖量进行相关分析,具体见表 3。表 3 显示,NR、NiR 酶活性与含糖率在甜菜全生育期内一直表现为负相关关系;NR 活性除了在 8 月份与产量和产糖量相关不显著外,其余各时期都与

表 2 氮磷钾处理水平与酶活性的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between NPK treatment levels and enzyme activities of sugar beet leaves

日期(月·日) date(month. day)	叶片 enNRA leaf enNRA			叶片 exNRA leaf exNRA			叶片 NiRA leaf NiRA			块根 NiRA root NiRA		
	r_N	r_P	r_K	r_N	r_P	r_K	r_N	r_P	r_K	r_N	r_P	r_K
6. 6	0. 9686 **	0. 4206	0. 8641	0. 9616 **	0. 4206	0. 8893 *	0. 9926 **	0. 9725 **	0. 8544	0. 9821 **	0. 8007	0. 4445
6. 22	0. 9615 **	0. 8287	0. 9366 *	0. 9446 *	0. 9902 **	0. 511	0. 9790 **	0. 9734 **	0. 9431 *	0. 9994 **	0. 8677	0. 9601 **
7. 8	0. 9734 **	0. 6058	0. 9469 *	0. 9554 *	0. 6573	0. 8566	0. 9447 *	0. 4998	0. 8641	0. 9631 **	0. 9575 *	0. 9240 *
7. 24	0. 9690 **	0. 9624 **	0. 9917 **	0. 9972 **	0. 9474 *	0. 9270 *	0. 8574	0. 8603	0. 0055	0. 9490 *	0. 9528 *	0. 7480
8. 7	0. 8867 *	0. 3034	0. 2189	0. 9404 *	0. 7534	0. 8831 *	0. 9235 *	0. 8809 *	0. 9582 **	0. 9472 *	0. 5617	0. 3987
8. 25	0. 942 *	0. 3161	0. 9818 **	0. 9755 **	0. 8998 *	0. 8713	0. 9759 **	0. 9082 *	0. 9098 *	0. 8923 *	0. 9709 **	-0. 1951
9. 11	0. 9875 **	0. 9151 *	0. 9673 **	0. 9648 **	0. 7691	0. 9425 *	0. 9506 *	0. 5482	0. 6904	0. 9542 *	0. 6713	0. 6350
9. 28	0. 9214 *	0. 8625	0. 9311 *	0. 9727 **	0. 8223	0. 9539 *	0. 9112 *	0. 9366 *	0. 9003 *	0. 9948 **	0. 7281	0. 9432 *

注: *和**表示 5% 和 1% 水平差异显著。下表同。

Note: * and ** denote significant difference at 0. 05 and 0. 01 levels, respectively. The same as following table.

表 3 酶活性与甜菜产量、含糖率和产糖量的相关关系

Table 3 Correlation between sugar beet yield, sugar content, sugar yield and enzymatic activity

日期(月·日) date(month. day)	酶 enzymes	取样部位 sampling location	产量 yield($t \cdot hm^{-2}$)	含糖率 sugar content(%)	产糖量 sugar yield($t \cdot hm^{-2}$)
6. 6	enNRA	叶片 leaf	0. 9302 **	-0. 7080 **	0. 8759 **
	exNRA	叶片 leaf	0. 8899 **	-0. 6515 **	0. 8463 **
	NiR	叶片 leaf	0. 6078 *	-0. 6515 **	0. 5046
		块根 root	0. 8141 **	-0. 4821	0. 8177 **
6. 22	enNRA	叶片 leaf	0. 7503 **	-0. 3764	0. 7656 **
	exNRA	叶片 leaf	0. 6300 *	-0. 2527	0. 6685 **
	NiR	叶片 leaf	0. 9726 **	-0. 6557 **	0. 9473 **
		块根 root	0. 9325 **	-0. 6609 **	0. 8975 **
7. 8	enNRA	叶片 leaf	0. 6414 **	-0. 3021	0. 6633 **
	exNRA	叶片 leaf	0. 2999	-0. 0746	0. 3364
	NiR	叶片 leaf	0. 8859 **	-0. 6390 *	0. 8473 **
		块根 root	0. 9348 **	-0. 6695 **	0. 8940 **
7. 24	enNRA	叶片 leaf	0. 7337 **	-0. 5631 *	0. 6773 **
	exNRA	叶片 leaf	0. 7627 **	-0. 5192 *	0. 7329 **
	NiR	叶片 leaf	0. 6042 *	-0. 2083	0. 6610 **
		块根 root	0. 8464 **	-0. 4948	0. 8498 **
8. 7	enNRA	叶片 leaf	0. 4758	-0. 6953 **	0. 3294
	exNRA	叶片 leaf	0. 6233 *	-0. 7285 **	0. 4931
	NiR	叶片 leaf	0. 9486 **	-0. 6764 **	0. 9145 **
		块根 root	0. 9326 **	-0. 6606 **	0. 8929 **
8. 25	enNRA	叶片 leaf	-0. 1526	-0. 0572	-0. 1734
	exNRA	叶片 leaf	0. 5059	-0. 4441	0. 4514
	NiR	叶片 leaf	0. 9126 **	-0. 6452 **	0. 8741 **
		块根 root	0. 6897 **	-0. 8051 **	0. 5459 *
9. 11	enNRA	叶片 leaf	0. 8286 **	-0. 5598 *	0. 7991 **
	exNRA	叶片 leaf	0. 9096 **	-0. 5664 *	0. 9010 **
	NiR	叶片 leaf	0. 9491 **	-0. 6593 **	0. 9216 **
		块根 root	0. 8169 **	-0. 5368 *	0. 7921 **
9. 28	enNRA	叶片 leaf	0. 7688 **	-0. 4134	0. 7859 **
	exNRA	叶片 leaf	0. 6379 *	-0. 5544 *	0. 5101
	NiR	叶片 leaf	0. 5911 *	-0. 7166 **	0. 4556
		块根 root	0. 9259 **	-0. 6885 **	0. 8784 **

产量和产糖量呈显著或极显著正相关关系; NiR 活性在全生育期内与产量保持显著或极显著相关关系, 与产糖量在生育中期相关达极显著水平。可见 NR、NiR

活性与块根产量、产糖量关系密切, 可以通过调节 2 种酶的活性来影响产量和产糖量的形成。

3 讨论

本试验通过不同水平氮磷钾处理甜菜,测定了叶片中的 NR 及 NiR 和根中的 NiR 活性,结果表明:内源、外源基质条件下甜菜叶片 NRA 的变化动态基本上一致,均随生育进程呈双峰曲线变化,苗期活性最高,叶丛形成末期或块根增长初期其次,在甜菜生育期内,外源 NR 活力(enNRA)均高于内源 NR 活性(exNRA)。此结果与李文华^[7]的试验结果相一致。在苗期,根系分化,地上部也在迅速进行器官建成,需要较高的 NR 活性促进 NO₃⁻ 吸收和转化,用来提供较多的氨基酸、蛋白质供器官建成。第 2 个高峰出现期间,甜菜正处于生育盛期,叶丛形成与块根增长相重叠,生长中心开始由叶部转至根部,功能叶片 NRA 的适当高值并协同氮代谢的其他酶既为形成繁茂叶丛,又为块根增大提供结构蛋白^[8]。所以甜菜对氮的吸收和同化以生育中前期为主,因此氮肥应作为基肥或早期追肥施用。

甜菜叶片 NiR 活性在整个生育期间基本呈“M”型曲线变化。块根 NiR 活性在整个生育期内均低于叶片 NiR 活性,二者的差值在苗期大于甜菜生育后期。在生育前期地上部生长较快,氮素代谢旺盛,而较多的结构蛋白和酶蛋白完成光合器官的建成,较高的酶活性有利于氮素的吸收和转化,促进叶丛生长;生育后期,酶活性显著减弱,对氮素吸收减少,氮代谢维持在较低水平,有利于蔗糖的合成和积累。

根据试验结果可以看出,NiR 活力变化趋势基本滞后 NRA 一个时期,由于甜菜体内氮代谢过程是 NR 将 NO₃⁻ 还原成 NO₂⁻,NiR 将 NO₂⁻ 还原成氨根,因此可以推出两者间的关系应是 NiR 酶蛋白活性需要 NR 还原产物 NO₂⁻ 的激活或是 NiR 的酶蛋白表达受 NO₂⁻ 调控,即 NiR 需要 NR 还原产物 NO₂⁻ 的激活,而 NO₂⁻ 过多又抑制 NR 活性,二者符合甜菜体内氮代谢规律。正是由于这 2 种酶的连续作用,所以植物体内没有明显的亚硝酸盐积累。

甜菜 NR 和 NiR 活性均随氮素水平的提高而增强,说明 NR 和 NiR 都是诱导酶,随诱导物的增加,酶活也相应提高,与郑怀忠等^[9,10]结论一致。磷素使 2 种酶的活性都有一定的提高,表明磷对氮代谢有促进作用。钾素虽然有一定的促进作用,但是与 2 种酶的

相关性不显著。本试验条件下,氮磷钾肥对甜菜供试品种的两种酶活性有不同程度的促进作用,而这种促进作用以氮素为最大,磷钾肥次之。通过酶活性与产量的相关分析表明,酶活性与产量密切相关,因此可以推断甜菜生产上可以在相应发育阶段通过增施相应肥料来调节酶活性,调控氮代谢的强度,进而协调氮糖代谢,最终促进甜菜产量的形成。相信随着研究的不断进行,将能更好地从理论上对提高甜菜产量、改善品质提供理论指导,促进甜菜生产效益的提高。

4 结论

氮磷钾肥对甜菜 NR 及 NiR 有不同程度的促进作用,氮素作用最大,磷钾肥次之。酶活性与产量的相关分析表明 2 种酶活力与产量密切相关,因此在甜菜生产上可以通过增施相应肥料来调节氮代谢的强度,进而促进甜菜产量的形成。

参考文献:

- [1] Faure J D, Vincenz M, Kronenberger J, Caboche M. Co-regulated expression of nitrate and nitrite reductases[J]. Plant J, 1991, 1: 107 - 113
- [2] 王玉琴. 内外生理条件下对小麦黄化幼苗叶片亚硝酸还原酶活性的影响[J]. 植物生理学通讯, 1988, (4): 18 - 20
- [3] 石晓艳, 曾彦达, 李世龙, 王玉波, 马凤鸣, 刁志伟. 甜菜亚硝酸还原酶(NiR)基因的克隆与表达分析[J]. 作物学报, 2011, 37(8): 1406 - 1414
- [4] 于海彬, 蔡 葆, 孙国琴. 甜菜硝酸还原酶活性研究[J]. 中国甜菜, 1993, (3): 18 - 23
- [5] Wray J L, Fido R J, Nitrite reductase and Lea P J. Methods in Plant Biochemistry. Vol. 3. Enzymes of Primary Metabolism [J]. New York: Academic Press, 1990, 249 - 253
- [6] 邵金旺, 蔡 葆, 张家骅. 甜菜生理学[M]. 北京: 农业出版社, 1991, 181 - 196
- [7] 李文华. 氮素水平和形态对甜菜(Beta vulgaris L.)形态建成和氮素同化的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2002
- [8] 马凤鸣, 高继国. 硝酸还原酶活力作为甜菜氮素营养诊断及预测产糖量指标的研究[J]. 中国农业科学, 1996, (5): 16 - 22
- [9] 郑怀忠, 陈发河, 李淑燕, 孙君社, 刘 萍. 亚硝酸还原酶高产菌株的筛选及发酵条件优化[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(3): 81 - 87
- [10] 葛文婷, 金喜军, 马春梅, 龚振平, 董守坤, 张 磊. 大豆硝酸还原酶活性及其与施氮关系的研究[J]. 核农学报, 2011, 25(5): 1036 - 1041

(责任编辑 邱爱枝)