植物营养与肥料学报 2013,19(1):45-54
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0106

施氮量对甜玉米产量、品质和蔗糖代谢酶活性的影响

赵福成[1,2], 景立权[1], 闫发宝[1], 陆大雷[1], 王桂跃[2], 陆卫平[1*]
(1 扬州大学,江苏省作物遗传生理重点实验室,江苏扬州 225009; 2 浙江省东阳玉米研究所,浙江东阳 322100)

摘要: 以甜玉米扬甜 2 号和超甜 135 为材料,设置纯氮 N 0、75、225、375 kg/hm^2 4 个处理,研究不同施氮量对甜玉米产量、品质和蔗糖代谢酶活性的影响。结果表明,施氮显著提高甜玉米扬甜 2 号和超甜 135 鲜穗产量,两品种均以施 N 225 kg/hm^2 产量最高,比不施氮分别增产 65.15%、99.61%。甜玉米籽粒发育过程中可溶性糖和蔗糖的含量随吐丝时间呈单峰曲线变化,施氮明显提高籽粒可溶性糖和蔗糖含量,施氮量为 N 225 kg/hm^{2}时最高。氮肥对甜玉米质构特性有较大影响,施氮量增多,籽粒的硬度显著增加;脆性随着施氮量的增加表现出先升高后降低的趋势,其中以氮肥用量在 N 225 kg/hm^2 最大。籽粒中蔗糖磷酸合成酶(SPS)和蔗糖合成酶(SS)合成方向活性的变化趋势与蔗糖含量变化一致,SS 分解方向活性随籽粒灌浆进程逐渐变大。合理施氮可提高甜玉米籽粒中 SPS 和 SS 合成方向活性,增加糖分,改善品质。

关键词: 甜玉米; 氮肥; 产量; 品质; 蔗糖代谢
中图分类号: S513.062.01 **文献标识码**: A **文章编号**: 1008-505X(2013)01-0045-09

Effects of nitrogen fertilization on yield, quality and enzyme activity associated with sucrose metabolism of sweet corn

ZHAO Fu-cheng[1,2], JING Li-quan[1], YAN Fa-bao[1], LU Da-lei[1], WANG Gui-yue[2], LU Wei-ping[1*]
(*1 Agronomy College, Yangzhou University/Key Lab of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2 Dongyang Institute of Maize Research, Dongyang, Zhejiang 322100, China*)

Abstract: To determine the effects of nitrogen fertilizer on fresh ear yield, quality and enzyme activity associated metabolism of sweet corn, a field experiment was conducted with two corn cultivars, Yangtian 2 and Chaotian 135. There were four nitrogen rates, N 0, 75, 225 and 375 kg/ha. The results show that the fresh ear yield of Yangtian 2 and Chaotian 135 are significantly increased under the nitrogen fertilization, and the yield is highest under N 225 kg/ha application. Compared with no-nitrogen treatment, the yields of the treatment with N 225 kg/ha of the two cultivars are increased by 65.15% and 99.61% respectively. The contents of soluble sugar and sucrose at the grain filling stage are single peaked curves. In a proper range of nitrogen level, the contents of soluble sugar and sucrose are increased significantly with the increase of nitrogen level, and the contents are highest under N 225 kg/ha application. The rates of nitrogen fertilization have great effects on texture properties of sweet corn, the hardness of grains is significantly increased with the amount of nitrogen fertilizer increased, and the fracturability is significantly increased at first and then decreased with the increase of N fertilizer application. The value of fracturability reaches the highest level under N 225 kg/ha application. The dynamic changes of activities of sucrose phosphate synthase (SPS) and sucrose synthase (SS, synthesis) are similar to the sucrose accumulation. With the proceeding of grain filling, the activity of SS (cleavage) is gradually increased. Appropriate N fertilizer could increase the activities of SPS and SS (synthesis) and improve the content of sugar and nutrition quality of sweet corn.

收稿日期: 2012-05-21 **接受日期**: 2012-09-22
基金项目: 国家自然科学基金(30971731, 31000684); 江苏省高校自然科学基金(11KJB210006); 江苏高校优势学科建设工程项目资助。
作者简介: 赵福成(1980—),男,山东嘉祥人,博士研究生,主要从事甜糯玉米生理生态和品种选育研究。E-mail: encliff@163.com
* 通信作者 Tel: 0514-87979377, E-mail: wplu@yzu.edu.cn

Key words: sweet corn; nitrogen fertilizer; yield; quality; sucrose metabolism

甜玉米(*Zea mays* L. *sacharata* Sturt)起源于中南美洲,受一个或多个隐性基因控制的普通玉米胚乳突变体,乳熟期籽粒具有含糖量高,营养丰富,风味好等特点,而广受青睐[1-2]。目前种植甜玉米经济效益显著,栽培面积不断扩大,已在我国农业产业结构调整中发挥重要的作用。作物产量高低和品质优劣除品种的遗传特性外,还受栽培措施和生态环境的影响[3-4]。氮是作物体内蛋白质、核酸、叶绿素、酶、维生素和一些激素的主要成分,处于代谢活动的中心地位,在作物生长中起驱动作用。施用氮肥是作物增产的重要手段,合理施用能促进碳同化,有利于增加产量改善品质[5-7]。

蔗糖是光合作用的产物,是碳水化合物在作物体内贮藏和积累的主要形式。甜玉米籽粒中碳水化合物的组成和含量是决定其品质的重要因素之一[8],这些碳水化合物包括可溶性糖、淀粉和蛋白质等,可溶性糖含量的高低直接决定甜玉米的食用品质,蔗糖是可溶性糖的主要组分[9]。蔗糖代谢主要由磷酸蔗糖合成酶(SPS)和蔗糖合成酶(SS)催化。SPS是以UDPG为供体,以6-磷酸果糖(F-6-P)为受体的糖转移酶,合成磷酸蔗糖,磷酸蔗糖在磷酸蔗糖酯酶的作用下脱磷酸形成蔗糖[10]。SS存在于细胞质中,催化的反应是可逆的,当SS分解活性大于合成活性时,蔗糖被分解,生成UDPG和果糖;当SS合成活性大于分解活性时,则有利于蔗糖的形成[11]。因此,通过对蔗糖代谢过程进行调控可达到提高甜玉米品质的目的,研究蔗糖代谢相关酶的活性,对于提高蔗糖含量进而提高甜玉米品质具有重要意义[12]。

氮素是影响产量和品质的重要元素,甜玉米对氮素营养非常敏感[13]。大量的研究表明,适量氮肥能够提高甜玉米产量[14-16],但对品质方面研究结果不尽相同。在甜玉米可溶性糖方面,有研究认为增施氮肥能显著降低籽粒中可溶性糖含量[17-18];王庆祥等[19]认为随着施氮量的增加,可溶性糖含量先升高再降低,合理施氮能够提高可溶性糖和蔗糖含量;陈英取等[20]研究表明,可溶性糖含量与施氮量呈"V"形曲线,施氮量为某一数值时可溶性糖含量最低,施氮量低于这一数值,随着施氮量的增加可溶性糖含量降低,高于这一数值时可溶性糖含量随施氮量的增加而升高;Ducanes[21]和Freymans[22]却认为在充足的灌溉条件下,甜玉米籽粒可溶性糖含量不受密度和氮肥的影响。但是,关于施氮对鲜食甜玉米籽粒品质形成规律及其蔗糖代谢特性的研究则鲜见报道。为此,本文开展了施用氮肥对甜玉米产量、品质及蔗糖代谢相关酶活性影响的研究,以期为甜玉米品种选育和优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2011年扬州大学农牧场进行,土质为砂壤土,地力中等。试验地0—20 cm土层土壤养分含量为:有机质15.74 g/kg、全氮1.36 g/kg、速效氮110.6 mg/kg、速效磷7.08 mg/kg、速效钾89.55 mg/kg。试验在磷、钾肥用量一致的条件下,设置4个施氮(N)量处理,分别为N_0(不施氮肥)、N_{75}(75 kg/hm^2)、N_{225}(225 kg/hm^2)、N_{375}(375 kg/hm^2),随机区组排列,3次重复,小区面积24 m^2。供试品种为扬甜2号和超甜135,7月1日播种,7月7日乳苗移栽,密度为60000 plant/hm^2,氮肥分两次施入,基肥为75 kg/hm^2,剩余的氮肥拔节期追施。P_2O_5和K_2O均75 kg/hm^{2}作为基肥一次性施入,其它管理措施统一按常规要求实施。

1.2 样品采集

于吐丝前在各小区选择生育进程一致的果穗挂牌标记,雌穗套袋。不同处理中扬甜2号吐丝期在8月20~26日,超甜135吐丝期在8月25~30日,在吐丝期分别进行人工授粉。各处理分别在吐丝后10、14、18、22、26、30 d于清晨露水未干时取5个挂牌果穗,用于各项测定和分析。其中,2个果穗蒸煮后进行物性测定。取其他3个果穗中部籽粒,一部分在105℃烘箱内杀青30 min然后在70℃恒温条件下烘干至恒重,同时测得含水量;另一部分置于-80℃超低温冰箱内保存,用于酶活性测定。

1.3 测定项目与方法

在乳熟期(吐丝后22 d)测定产量:每小区采收中间2行果穗,进行测产。

物性测定:采用物性分析仪TA. XT. Plus(英国Stable micro systems公司)测定。物性分析仪主要是通过模拟人口腔的咀嚼运动,对样品进行两次压缩,可分析物性特征参数如硬度、脆性、黏着性、内聚性、弹性、粘聚性、咀嚼性、回复性[23]。在挂牌果穗中,选取均匀一致果穗2个,去掉苞叶放入电饭煲中蒸煮20 min后,自然冷却到60℃,选择每穗玉米

中间部分，剥其中一竖行完整的籽粒，并选取一致的 8 个粒籽粒进行 TPA（Texture Profile Analysis，质地剖面分析）测定。测定条件为：籽粒远胚面朝上，用 P/36R 探头，测前速率 1 mm/s，测试速率 5 mm/s，测后速率为 5 mm/s，压缩程度设为 90%，停留间隔 5 s，触发值 5 g。

可溶性糖和淀粉含量测定用蒽酮比色法，蔗糖用间苯二酚法测定[24]。

酶液提取参照 Doehlert 等[25]和 Ou-Lee 等[26]的方法并略作改进。具体步骤如下：称取 1.00 g 左右冰冻籽粒置入研钵中加入液氮研磨，成粉末后加入 10 mL 预冷的 50 mmol/L HEPES-NaOH 缓冲液（pH 7.5），再于 10000 ×g 冰冻离心 10 min，上清液即为酶提取液。

蔗糖酶活性的测定参照 Wardlaw[27]的方法，略作改进。蔗糖磷酸合成酶（SPS）活性测定：50 μL 酶提取液加 50 μL HEPES-NaOH、20 μL 50 mmol/L $MgCl_2$、20 μL 100 mmol/L UDPG、20μL 6－磷酸果糖于 30℃水浴锅中反应 30 min，迅速加入 200 μL 2 mol/L NaOH 摇匀，沸水浴 10 min。再加入 2.0 mL 30% 的盐酸于 80℃保温 10 min，最后加入 1 mL 1% 的间苯二酚，同样在 80℃保温 10 min 后冷却至室温，加入 3.64 mL 超纯水摇匀，用 722S 可见分光光度计于 480 nm 波长下比色，用蔗糖生成量表示酶活性。

蔗糖合成酶（SS）合成和分解方向的活性测定：将 50 μL 酶提取液加入 50 μL HEPES-NaOH、20 μL 50 mmol/L $MgCl_2$（SS 合成）/$MgSO_4$（SS 分解）、20 μL 100 mmol/L UDPG、20 μL 果糖于 30℃水浴锅中反应 30 min，迅速加入 200 μL 2 mol/L NaOH 摇匀，并沸水浴 10 min。再加入 2.0 mL 30% 的盐酸于 80℃保温 10 min，最后加入 1 mL 1% 的间苯二酚，在 80℃保温 10 min 后冷却至室温，加入 3.64 mL 超纯水摇匀，用 722S 可见分光光度计于 480 nm 波长下比色。

1.4　数据分析

数据采用 Excel 2007、SPSS 13.0 for Windows 软件处理，用 ANOVA 进行方差分析，LSD 法进行差异显著性检验，采用 SigmaPlot 10.0 作图。

2　结果与分析

2.1　施氮量对甜玉米鲜穗产量的影响

施用氮肥能显著增加甜玉米鲜穗产量。方差分析结果表明，鲜穗产量在两品种间未达显著水平（$F = 1.21$，$P > 0.05$），氮肥处理间（$F = 48.31$，$P < 0.01$）达极显著水平。由图 1 可看出，扬甜 2 号、超甜 135 鲜穗产量在处理间，均以 N_0 最低，以 N_{225} 最高；N_{225} 处理的产量在两品种中比 N_0 分别增产 65.15%、99.61%。当氮肥用量超过 N 225 kg/hm^2 后，产量又降低。

2.2　施氮量对甜玉米品质的影响

2.2.1 对甜玉米籽粒物性的影响　物性分析仪可将食品的感观品质以量化的形式表示[23]。由表 1 可知，甜玉米在两品种间物性指标受施氮量影响较大。除超甜 135 的黏着性和回复性在处理间差异未达显著水平，扬甜 2 号除黏着性受施氮量的影响较小外，

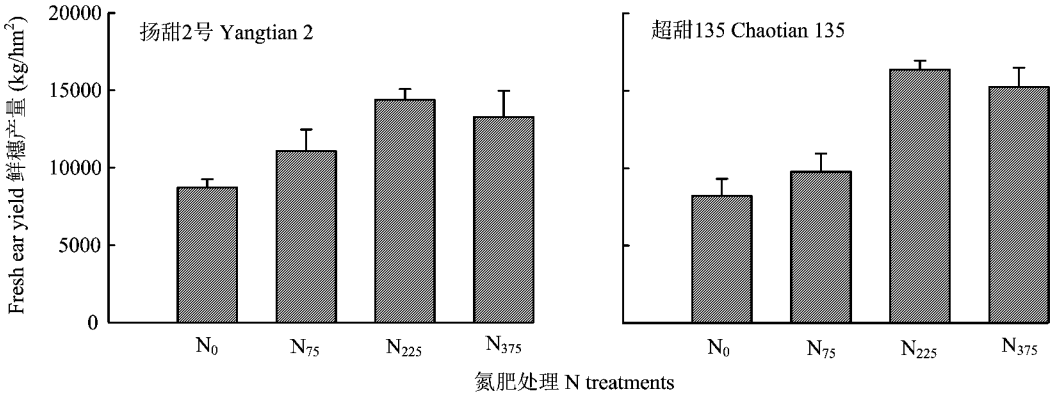

图 1　施氮量对甜玉米鲜穗产量的影响

Fig. 1　Effects of different nitrogen rates on the fresh ear yields of sweet corn

［注（Note）：柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among different treatments at the 5% level.］

表1 施氮量对鲜食甜玉米籽粒特性的影响

Table 1 Effects of different nitrogen rates on the fresh sweet corn grain textural characteristics

品种 Cultivar	氮处理 N	硬度 (g) Hardness	脆性 (g) Fracturability	黏着性 Adhesiveness	弹性 Springiness	粘聚性 Cohesiveness	咀嚼性 Chewiness	回复性 Resilience
超甜135 Chaotian 135	N_0	6760.47 c	2291.14 c	-4.80 a	0.29 b	0.20 b	436.11 b	0.17 a
	N_{75}	8408.16 b	3252.55 ab	-9.83 a	0.31 b	0.21 b	542.83 b	0.16 a
	N_{225}	9309.64 ab	3771.06 a	-5.89 a	0.41 a	0.24 a	933.18 a	0.19 a
	N_{375}	9608.99 a	2917.98 b	-6.17 a	0.47 a	0.21 b	1049.02 a	0.19 a
扬甜2号 Yangtian 2	N_0	8058.05 b	2667.20 b	-14.00 a	0.31 b	0.20 b	505.00 b	0.15 bc
	N_{75}	8911.84 b	2949.84 b	-8.09 a	0.50 a	0.23 a	1116.11 a	0.17 ab
	N_{225}	7886.74 b	3478.23 a	-6.80 a	0.29 b	0.18 b	426.40 b	0.14 c
	N_{375}	12882.76 a	1679.43 c	-10.35 a	0.38 b	0.16 b	1330.95 a	0.19 a
					F 值 *F*-value			
品种 Cultivar (C)		7.30**	6.22*	1.66	0.035	0.10	1.49	3.16
氮 Nitrogen (N)		22.91**	22.07**	0.868	6.69**	5.17**	12.58**	3.58*
品种×氮 (C×N)		8.28**	1.275**	1.28	9.96**	5.62**	7.14**	3.83*

注(Note)：同一列数值后不同字母表示相同品种处理间差异达5%水平 Values of the same cultivar followed by different letters in the same column are significantly different at the 5% level. * — $P<0.05$；** — $P<0.01$.

其余物性指标在处理间达显著或极显著水平。其中，两个品种的硬度随施氮量的增加而变大，以 N_{375} 处理最高，脆性和粘聚性随施氮量的增加而先上升后下降，不同处理间达显著水平。

2.2.2 对水分、可溶性糖、蔗糖、淀粉的影响 不同氮肥用量下，两品种鲜食籽粒含水量随吐丝后时间变化呈明显下降趋势(图2-A、B)，吐丝授粉后10～22 d，降低较缓慢，22 d后降低较快，在采收期(吐丝后22 d)，N_0 和 N_{75} 处理的含水量均低于 N_{225} 和 N_{375}，22 d后 N_0 处理的含水量下降迅速；可溶性糖(图2-C、D)和蔗糖(图2-E、F)的含量均随吐丝后时间变化先上升后降低，呈单峰曲线；随着粒重的增加表现明显的“稀释效应”，因此粒重增加导致可溶性糖和蔗糖的含量降低。扬甜2号各处理的可溶性糖峰值出现在吐丝后22 d，超甜135籽粒 N_0 处理可溶性糖含量峰值出现在吐丝后22 d，其它处理的峰值出现在吐丝后18 d，两品种以 N_{225} 处理可溶性糖含量最高，N_0 含量最低。籽粒蔗糖含量变化趋势和可溶性糖基本一致，两品种各处理蔗糖的峰值均出现在22 d，且施氮处理峰值均高于不施氮处理。两品种籽粒淀粉含量呈上升趋势(图2-G、H)，在吐丝后22 d前，淀粉积累速率较慢，吐丝后22 d以后淀粉积累速率明显加快；以不施肥 N_0 处理淀粉含量最低，以 N_{375} 处理淀粉含量最高。

2.3 施氮量对甜玉米蔗糖代谢酶的影响

SPS活性的高低反映了甜玉米光合产物转化为蔗糖的能力。由图3-A、B可以看出，两甜玉米品种籽粒的SPS酶活性变化趋势与蔗糖含量的变化基本一致，在整个籽粒发育过程中，均以 N_{225} 处理SPS酶活性最高，都表现出不施氮处理低于施氮处理。扬甜2号在吐丝后22 d达到峰值，此时的SPS活性表现为：$N_{225}>N_{375}>N_{75}>N_0$。超甜135吐丝后18 d达到峰值，此时SPS活性表现为 $N_{225}>N_{75}>N_{375}>N_0$。从图3-C、D可以看出，籽粒中SS合成活性变化亦为单峰曲线，施氮使SS合成活性变大。扬甜2号在吐丝后22 d达到峰值，此时SS合成活性表现为 $N_{225}>N_{75}>N_{375}>N_0$。超甜135吐丝后18 d达到峰值，此时SS合成活性表现为 $N_{225}>N_{375}>N_{75}>N_0$；由图3-E、F可看出，甜玉米籽粒SS分解活性在吐丝后随着生育进程的推进而升高，呈“S”曲线，在吐丝后18 d前SS酶分解活性增加缓慢，18～26 d增加迅速，26 d后又增速较缓。在两品种中，玉米SS分解活性均表现出施氮处理大于不施氮处理。

3 讨论与结论

氮肥水平是决定玉米产量的关键措施之一[28]。

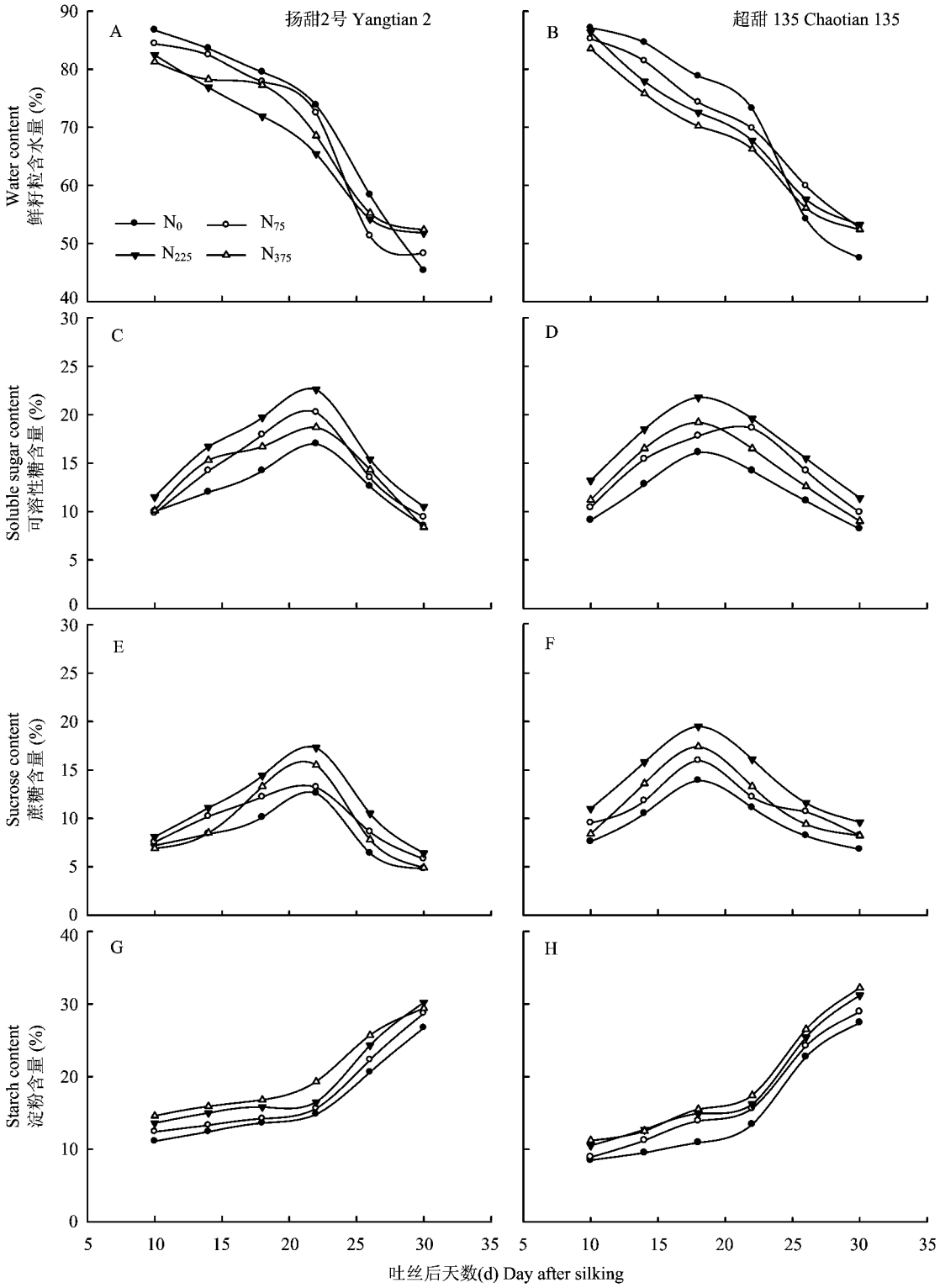

图 2　不同施氮量下甜玉米籽粒水分、可溶性糖含量、蔗糖含量及淀粉含量的动态变化

Fig. 2　Dynamics of the contents of water, soluble sugar, sucrose and starch in grains of sweet corn under different nitrogen application rates

受生态环境、栽培措施和品种特性等因素的影响，甜玉米氮肥施用量的适宜范围存在较大差异，但目前生产上，为求高产而偏施重施氮肥的现象很普遍。本研究结果表明，施氮能显著提高两甜玉米品种鲜穗产量，随着施氮量的增加产量先升高后降低，以施氮量为 225 kg/hm^2 时产量最高，比不施氮分别增产

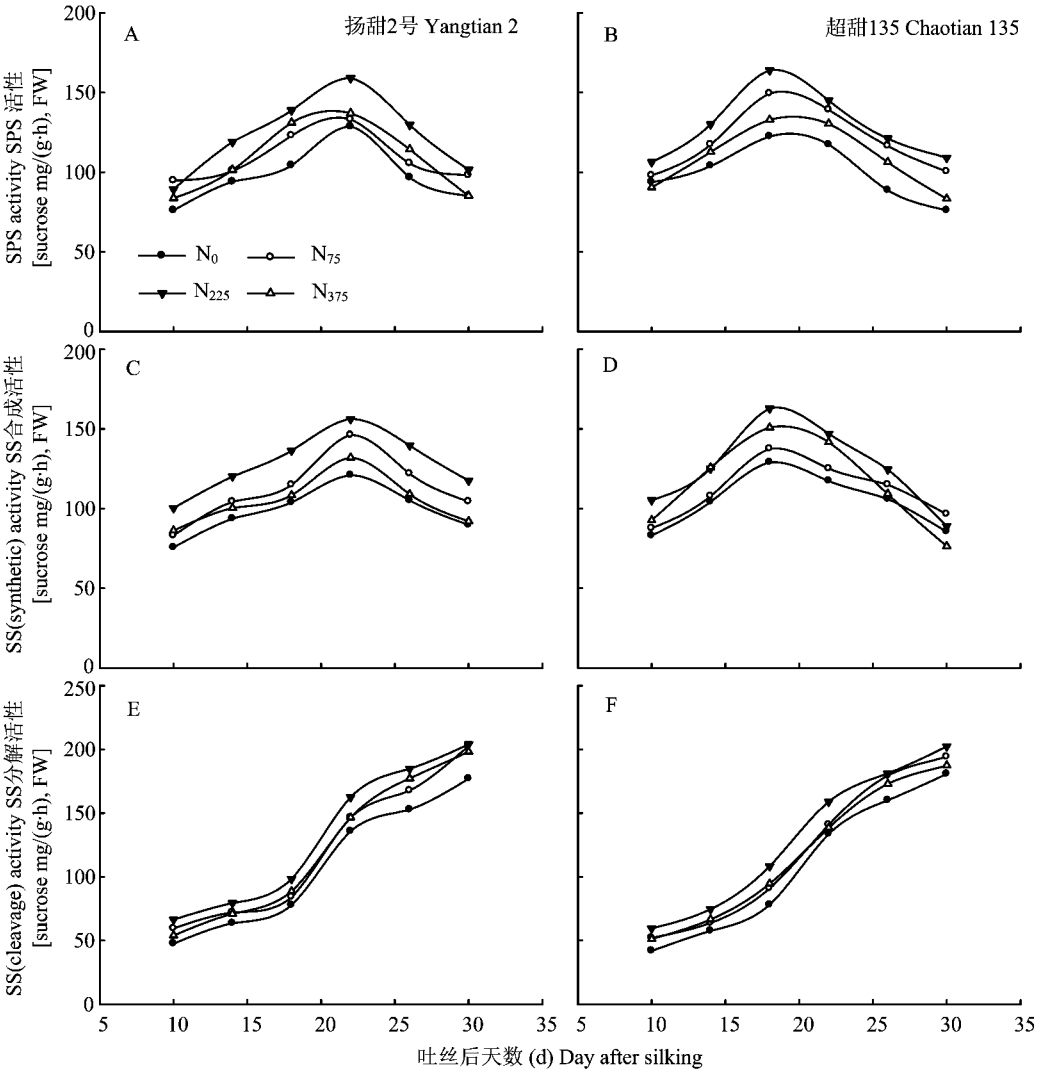

图3 不同施氮量下对甜玉米籽粒 SPS、SS(合成方向)、SS(分解方向)活性的动态变化

Fig. 3 Dynamics of the activities of SPS, SS (synthetic) and SS (cleavage) in grains of sweet corn under different nitrogen application rates

65.15%(扬甜2号)、99.61%(超甜135)。合理施用氮肥可增加甜玉米可溶性糖和蔗糖含量,改善品质;氮肥过量时糖分下降,籽粒碳水化合物积累减少,影响了甜玉米品质,这和前人在普通玉米、小麦上的研究结果一致[10,25]。扬甜2号可溶性糖和蔗糖含量最高值出现在吐丝后22 d,超甜135基本出现在吐丝后18 d,这可能是由于品种间基因型差异造成的。

TPA测试以量化的形式客观全面地评价食品物性,避免了人为因素对品质评价结果的主观影响,在食品、蔬果上得到了广泛应用[29-30]。本研究中,除超甜135的黏着性、回复性和扬甜2号的黏着性受施氮量的影响较小外,其余物性参数受施氮量的影响较大。其中,两品种的硬度随施氮量的增加而变大,脆性和粘聚性随施氮量的增加而先升后降,处理间达显著水平。说明氮肥用量增大,两品种甜玉米籽粒的硬度增大;当施氮量小于N 225 kg/hm^{2}时,脆性随施氮量增大而增大,高氮水平下脆性降低。甜玉米具有"鲜、甜、脆、嫩"特点,物性参数中硬度和脆性能够反映出甜玉米的口感。因此,施氮量影响甜玉米的品尝品质,氮肥过量时籽粒硬度变大、脆性变低、品质下降。

在玉米中参与蔗糖代谢的酶主要有SPS、SS,其中SS有蔗糖合成和降解两个作用方向[25,31-32]。本研究结果表明,两品种甜玉米籽粒SPS(图2-A、B)和SS合成(图2-C、D)活性在籽粒灌浆过程中呈单峰曲线,变化趋势与蔗糖含量的变化基本一致。在一定范围内随着施氮量的增加SPS和SS合成方

向酶的活性增大，光合产物向蔗糖的转化速率加快，氮肥不足或过量时均导致酶活性降低，这与前人在小麦[33]、普通玉米[34-35]、黄瓜[36]上的结论相似。在玉米中叶片和苞叶光合作用产物以蔗糖的形式向籽粒运转，普通玉米的蔗糖在淀粉合成酶的作用下，蔗糖转化成淀粉，淀粉大量积累；超甜玉米由于胚乳隐性基因的突变，突变发生在淀粉合成的上游，淀粉合成受阻，蔗糖为主的可溶性糖大量积累而淀粉含量减少。Harbron 等[37]、Thomas 等[38]指出，SPS 可能是蔗糖合成途径中的一个重要调控点，它的活性反映蔗糖合成能力的高低，在大豆[39-40]、小麦[41]上也证实了这一观点。Gonzales 等[42]和 Doehlert 等[43]研究认为，甜玉米积累较多蔗糖的原因可能是蔗糖合成量的增加以及降解量的减少，但刘鹏等[44]认为甜玉米籽粒蔗糖积累较多的原因主要得益于蔗糖合成能力的增加，而非降解量的减少。本研究中，在甜玉米籽粒发育前期，以 SPS、SS 合成和 SS 分解活性均呈上升趋势，只是 SPS 和 SS 合成活性上升的较快，SS 分解活性上升缓慢，蔗糖合成速率大于分解速率，表现蔗糖的积累；而乳熟末期（吐丝 22 d 后）SS 分解活性迅速增大，而 SPS 和 SS 合成方向活性下降，蔗糖合成速率下降，部分蔗糖转化成淀粉，淀粉积累速率上升，表现为可溶性糖含量下降，淀粉含量上升，这与刘鹏等的研究结果基本一致。因此，合理施氮可提高 SPS 和 SS 合成方向活性，有利于甜玉米提高糖分，改善品质。

参 考 文 献：

[1] 曾孟潜，刘雅楠，杨涛兰，等. 甜玉米、笋玉米的起源与遗传[J]. 遗传，1999，21(3)：44-45.
Zeng M Q, Liu Y N, Yang T L *et al*. The evolution and genetics of sweet corn and baby corn[J]. Acta Genet. Sin., 1999, 21(3): 44-45.

[2] 李小琴，王青峰. 广东省甜玉米发展现状与对策探讨[J]. 作物杂志，2007，(3)：32-34.
Li X Q, Wang Q F. Production and future development of sweet corn in Guangdong[J]. Crops, 2007, (3): 32-34.

[3] 陆大雷，郭换粉，陆卫平. 播期、品种和拔节期追氮量对糯玉米淀粉粒分布的影响[J]. 中国农业科学，2011，44(2)：263-270.
Lu D L, Guo H F, Lu W P. Effects of sowing date, variety and nitrogen top-dressing at jointing stage on starch granule size distribution of waxy maize[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(2): 263-270.

[4] 王旭清，王法宏. 栽培措施和环境条件对小麦子粒品质的影[J]. 山东农业科学，1999，(1)：52-55.
Wang X Q, Wang F H. Effect of culture measures and eco-conditions on wheat grain quality[J]. Shandong Agric. Sci., 1999, (1): 52-55.

[5] 孙占祥，孙文涛. 水肥互作对玉米生长发育及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报，2005，36(3)：275-278.
Sun Z X, Sun W T. Effects of water-fertilizer interaction on growth and yield of maize[J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2005, 36(3): 275-278.

[6] 徐祥玉，张敏敏，翟丙年，等. 施氮对不同基因型夏玉米干物质累积转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(4)：786-789.
Xu X Y, Zhang M M, Zhai B N *et al*. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and translocation of different genotypes of summer maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(4): 786-789.

[7] 程杏安，梁秀兰，胡美英. 不同施氮量对秋播超甜玉米产量性状的影响[J]. 中国农学通报，2011，27(9)：291-294.
Cheng X A, Liang X L, Hu M Y. Effect of different nitrogen application levels on yield traits of fall super-sweet maize[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2011, 27(9): 291-294.

[8] 孙政才，张国平. 甜玉米与普通玉米籽粒发育过程中碳水化合物及氨基酸消长规律的比较研究 Ⅰ. 籽粒灌浆特性及碳水化合物消长规律[J]. 作物学报，1992，18(4)：301-306.
Sun Z C, Zhang G P. Comparative studies on the norm of the variation of carbohydrate and amino acid contents in the developing grains of sweet corn and normal corn (*Zea mays* L.) Ⅰ. Grain filling characteristics and the norm of the variation of carbohydrate content[J]. Acta. Agron. Sin., 1992, 18(4): 301-306.

[9] 乐菊素，刘厚诚，张壁，等. 超甜玉米籽粒乳熟期碳水化合物变化及食用品质[J]. 华南农业大学学报，2004，24(2)：9-11.
Le J S, Liu H C, Zhang B *et al*. Change of carbohydrate and taste quality in the kernel of super-sweet corn in the milky maturity stage[J]. J. South China Agric. Univ., 2004, 24(2): 9-11.

[10] 李永庚，于振文，姜东，余松烈. 冬小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉合成动态及与其有关的酶活性的研究[J]. 作物学报，2001，27(5)：658-664.
Li Y G, Yu Z W, Jiang D, Yu S L. Studies on the dynamic changes of the synthesis of sucrose in the flag leaf and starch in the grain and related enzymes of high-yielding wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(5): 658-664.

[11] 覃鸿妮，蔡一林，孙海燕，等. 种植密度对不同株型玉米蔗糖代谢和淀粉合成相关酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报，2010，18(6)：1183-1188.
Qin H N, Cai Y L, Sun H Y *et al*. Effects of planting density on sucrose metabolism and activities of enzymes related to starch synthesis in maize hybrids with different plant types[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(6): 1183-1188.

[12] 曹玉军，赵宏伟，王晓慧，等. 施钾对甜玉米产量、品质及蔗糖代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4)：881-887.
Cao Y J, Zhao H W, Wang X H *et al*. Effects of potassium fertilization on yield, quality and sucrose metabolism of sweet

maize [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 881-887.

[13] 和亮, 刘宏斌, 文宏达, 等. 设施菜地夏季休闲期甜玉米经济产量及环境效益分析[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 105-109.
He L, Liu H B, Wen H D *et al*. Economic yield and environmental benefits of sweet corn on facility vegetable field in summer[J]. J. Maize Sci., 2011, 19(5): 105-109.

[14] 张红芳, 王璞, 张来生, 等. 不同密度下施氮对甜玉米果穗形成的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 125-130.
Zhang H F, Wang P, Zhang L S *et al*. Effects of nitrogen application on formation of ear under different densities in sweet corn[J]. J. Maize Sci., 2008, 16(2): 125-130.

[15] Wu P, Dai Q J, Tao Q N. Effect of fertilizer rates on the growth, yield and kernel composition of sweet corn[J]. Commun. Soil Sci. Plan., 1993, 24(3-4): 237-253.

[16] Rangarajan A, Ingall B, Orfanedes M, Wotfe D. In-row spacing and cultivar affects ear yield and quality of early-planted sweet corn [J]. Hort. Technol., 2002, 12(3): 410-415.

[17] 楚玲, 陆发熹, 刘树基. 氮钾肥配施对赤红壤上甜玉米生长影响的研究[J]. 华南农业大学学报, 1989, 10(3): 43-52.
Chu L, Lu F X, Liu S J. A study on the effects of nitrogen fertilizer combined with potassium fertilizer on the growth of sweet corn on lateritic red soil [J]. J. South China Agric. Univ., 1989, 10(3): 43-52.

[18] Mengel K, Kirby E A. Principles of plant nutrition (3rd Ed.) [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1982. 374-398.

[19] 王庆祥, 姜艳超, 吕桂兰. 氮、钾肥对甜玉米产量与品质的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(3): 145-146.
Wang Q X, Jiang Y C, Lü G L. Effect of nitrogen and potassium on grain yield and quality of sweet maize[J]. J. Maize Sci., 2006, 14(3): 145-146.

[20] 陈英取, 张承林, 张其伦, 陈火君. 氮磷钾用量及配比对甜玉米产量与品质的影响[J]. 华南农业大学学报, 1993, 14(1): 33-38.
Chen Y Q, Zhang C L, Zhang Q L, Chen H J. Effect of applying N, P, K on yield and quality of sweet corn[J]. J. South China Agric. Univ., 1993, 14(1): 33-38.

[21] Ducanes A A. Nitrogen fertilization and plant population on yield and quality of sweet corn (*Zea mays* L.) [M]. Maynila: University of Philippines, 1984.

[22] Freyman S, Kaldy M S, Kozub G C *et al*. Spacing and fertilizer studies on sweet corn under irrigation in southern Alberta[J]. J. Can. Plant Sci., 1972, 52(6): 881-886.

[23] Bourne M C. Food texture and viscosity [M]. New York: Academic Press, 2002. 254-262.

[24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Li H S. The principles and techniques of plant physiological and biochemical[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[25] Doehlert D C, Kuo T M, Felker F C. Enzymes of sucrose and hexose metabolism in developing kernels of two inbreeds of maize [J]. Plant Physiol., 1988, 86: 1013-1019.

[26] Ou-Lee T M, Setter T L. Effect of increased temperature in apical regions of maize ears on starch-synthesis enzymes and accumulation of sugars and starch [J]. Plant Physiol., 1985, 79: 852-855.

[27] Wardlaw I F. The early stages of grain development in wheat: Response to water stress in a single variety[J]. J. Aust. Biol. Sci., 1971, 24(6): 1047-1055.

[28] 宁堂原, 李增嘉, 焦念元, 等. 不同熟期玉米品种春夏套作对全株饲用营养价值的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 443-448.
Ning T Y, Li Z J, Jiao N Y *et al*. Effects of different maturity maize cultivars relay-cropping in spring-sowing and summer-sowing on the nutritive values of whole plant of feeding[J]. Acta Agron. Sin., 2004, 30(5): 443-448.

[29] 马庆华, 王贵禧, 梁丽松. 质构仪穿刺试验检测冬枣质地品质方法的建立[J]. 中国农业科学, 2011, 44(6): 1210-1217.
Ma Q H, Wang G X, Liang L S. Establishment of the detecting method on the fruit texture of Dongzao by puncture test [J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(6): 1210-1217.

[30] 潘秀娟, 屠康. 质构仪质地多面分析(TPA)方法对苹果采后质地变化的检测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 166-170.
Pan X J, Tu K. Comparison of texture properties of post-harvested apple using texture profile analysis[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2005, 21(3): 166-170.

[31] Tracy W F, Whitt S R, Buckler E S. Recurrent mutation and genome evolution: example of *Sugar I* and the origin of sweet maize [J]. Crop Sci., 2006, 46: 49-54.

[32] Worrell A C, Bruneau J M, Summerfelt K *et al*. Expression of a maize sucrose phosphate synthesis in tomato leaf carbohydrate partitioning[J]. Plant Cell, 1991, 3: 1121-1130.

[33] 史金, 茹园园, 谭金芳, 等. 施氮对冬小麦旗叶蔗糖含量及籽粒淀粉合成的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(3): 497-502.
Shi J, Ru Y Y, Tan J F *et al*. Effects of nitrogen fertilizer application on sucrose content of flag leaf and starch synthesis in the grain of different winter wheat varieties[J]. J. Tritic. Crops, 2007, 27(3): 497-502.

[34] 陈洋, 赵宏伟. 氮素用量对春玉米穗位叶蔗糖合成关键酶活性的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(1): 115-118.
Chen Y, Zhao H W. Effect of nitrogen application on activities of key enzymes of sucrose synthesis in the leaf located near the ear of spring maize[J]. J. Maize Sci., 2008, 16(1): 115-118.

[35] 张智猛, 戴良香, 胡昌浩, 等. 氮素对玉米淀粉累积及相关酶活性的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(7): 956-962.
Zhang Z M, Dai L X, Hu C H *et al*. Effect of nitrogen on starch accumulation and related enzyme activities maize (*Zea mays* L.) [J]. Acta Agron. Sin., 2005, 31(7): 956-962.

[36] 李冬梅, 魏珉, 张海森, 王秀峰. 氮、磷、钾用量和配比对温室黄瓜叶片相关代谢酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学

报, 2006, 12(3): 382-387.
Li D M, Wei M, Zhang H S, Wang X F. Effects of NPK rates and rations on activities of metabolism enzymes in leaves of cucumber in greenhouse[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(3): 382-387.

[37] Harbron S, Foyer C, Walker D. The purification and properties of sucrose-phosphate synthetase from spinach leaves: the involvement of this enzyme and fructose bio-phosphatase in the regulation of sucrose biosynthesis[J]. Arch Biochem. Biophy., 1981, 212: 237-246.

[38] Thomas W R J, Phillip S K, Huber S C. Characterization of diurnal changes in activities of involved in sucrose biosynthesis [J]. Plant Physiol., 1983, 73: 428-433.

[39] Huber S C, Huber J L. Role and regulation sucrose phosphate syntheses in higher plants [J]. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol., 1996, 47: 431-445.

[40] Doehlert D C, Huber S C. Regulation of spinach leaf sucrose phosphate synthase by glucose-6-phosphate inorganic phosphate and pH [J]. Plant Physiol., 1983, 73(4): 989-994.

[41] 姜东, 于振文, 李永庚, 余松烈. 施氮水平对高产小麦蔗糖含量和光合产物分配及籽粒淀粉积累的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2): 157-162.
Jiang D, Yu Z W, Li Y G, Yu S L. Effects of different nitrogen application levels on changes of sucrose content in leaf, culm, grain and photosynthate distribution and grain starch accumulation of winter wheat [J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(2): 157-162.

[42] Gonzales J W, Rhodes A M, Dickinson D B. Carbohydrate and enzymic characterization of a high sucrose sugary inbred line of sweet corn[J]. Plant Physiol., 1976, 58: 28-32.

[43] Doehlert D C, Tsung M K. Characteristics of carbohydrate metabolism in sweet corn endosperm[J]. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 1993, 118(5): 661-666.

[44] 刘鹏, 胡昌浩, 董树亭, 等. 甜质型与普通型玉米籽粒发育过程中糖代谢相关酶活性的比较[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 52-58.
Liu P, Hu C H, Dong S T *et al*. Comparison of enzymes activity associated with sucrose metabolism in the developing grains between sweet corn and normal corn [J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(1): 52-58.