

网络出版时间:2017-03-31 16:08

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.05.007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170331.1608.014.html>

土壤盐分胁迫对甜高粱茎秆糖分积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响

刘海波,魏玉清,周维松,邹程

(北方民族大学 生物科学与工程学院,宁夏 银川 750021)

【摘要】【目的】研究土壤盐分胁迫对甜高粱茎秆中糖分积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响,探明盐胁迫条件下甜高粱茎秆的糖分积累特征。【方法】以甜高粱杂交品种“辽甜1号”为研究材料,采用高效液相色谱法和酶学测定方法,对5种不同土壤盐分(分别为对照CK(0.102%)、T1(0.215%)、T2(0.250%)、T3(0.300%)、T4(0.459%),以上为质量分数)胁迫下,甜高粱各生育时期(拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期、成熟期)茎秆中的糖分(葡萄糖、果糖、蔗糖)含量和糖代谢相关酶(蔗糖磷酸合成酶(SPS)、蔗糖合成酶合成方向(SS-s)、蔗糖合成酶分解方向(SS-d)、中性转换酶(NI)、酸性转换酶(AI))活性进行测定。【结果】(1)甜高粱茎秆总糖在灌浆期积累最多,蔗糖是影响总糖含量的主要因素,土壤盐质量分数在0.215%~0.300%时,总糖、蔗糖含量随盐胁迫程度加深呈现增加的趋势。(2)低盐胁迫(0.215%~0.300%)可使甜高粱茎秆中SPS、SS-d、SS-s、AI活性增加,而对NI活性无显著影响。(3)甜高粱茎秆中总糖含量与蔗糖含量和AI活性呈显著正相关,而与其他酶无显著相关性。【结论】甜高粱茎秆糖分累积是各种酶共同作用的结果,其中AI是调控甜高粱茎秆总糖的关键酶。

【关键词】 土壤盐分;甜高粱;糖分积累;糖代谢相关酶

【中图分类号】 S514.01

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)05-0041-07

Effect of salt soil stress on sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzymes of sweet sorghum stem

LIU Haibo, WEI Yuqing, ZHOU Weisong, ZOU Cheng

(College of Biosciences and Bioengineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: 【Objective】 The effect of soil salt stress on sugar content and activities of sucrose metabolism related enzymes of sweet sorghum stalks were studied. 【Method】 The sweet sorghum hybrid Liaotian-1 was tested under five different salinity soils (including control CK 0.102%, T1 0.215%, T2 0.250%, T3 0.300% and T4 0.459% in mass fraction). The contents of stalk glucose, fructose and sucrose and activities of sugar metabolism related enzymes such as sucrose phosphate synthase, sucrose synthase synthesis direction (SS-s), sucrose synthase decomposition direction (SS-d), neutral converting enzyme (NI) and acid converting enzyme (AI) at five different growth periods (jointing stage and booting stage, flowering period, filling stage, and mature period) were determined by HPLC and enzyme method. 【Result】 1) Sweet sorghum stalks total sugar accumulation in the mature period was the highest among different periods. Sucrose was the dominant factor influencing the total sugar content, and the total sugar and sucrose content of stalk was higher when soil salt concentration mass fraction was 0.215%—0.300% com-

【收稿日期】 2016-01-21

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31060180);北方民族大学重点科研项目(2015KJ38)

【作者简介】 刘海波(1990—),男,内蒙古赤峰人,在读硕士,主要从事植物生理生态研究。E-mail:15209612625@163.com

【通信作者】 魏玉清(1969—),男,宁夏同心人,教授,博士,主要从事植物逆境生理与生物质能源研究。E-mail:weiyuqing@126.com

pared to other salt stresses. 2) Low soil salt stress (0.215%—0.300%) increased activities of SPS, SS-d, SS-s and AI, but had no significant effect on NI. 3) The total sugar were significantly correlated with sucrose and AI with correlation coefficients of 0.935 and -0.892. 【Conclusion】 Sweet sorghum stalks sugar accumulation was controlled by various enzymes and AI was the key regulation enzyme for total sugar of sweet sorghum stalks.

Key words: soil salinity; sweet sorghum; sugar accumulation; sugar metabolism related enzymes

盐碱土是地球上分布广泛的一种土壤类型,是一种重要的土地资源^[1]。我国是世界盐碱地大国,各类盐渍土面积约 $3.46 \times 10^7 \text{ hm}^2$,耕地盐碱化面积 $7.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$,近 20%耕地发生盐碱化。而且随着干旱频繁发生、化肥使用及灌溉农业发展等,次生盐碱地面积还在逐年扩大^[2-3]。在人口增加、耕地减少、淡水资源不足的压力下,如何利用盐渍土壤发展农业,提高作物产量成为我国需要迫切解决的问题之一。

甜高粱具有抗旱、耐涝、耐盐碱、耐瘠薄、耐高温等特点,非常适合在水资源缺乏的干旱和半干旱地区种植,有“高能作物”之美称^[4]。甜高粱茎秆富含多糖、籽粒富含淀粉、秆渣富含纤维素和半纤维素,均为发酵制取燃料酒精的合适原料。因此,它作为新兴的糖料、饲料和能源作物广泛受到人们的重视,具有良好的推广和应用前景^[5]。糖分是甜高粱茎秆中的重要组成部分,糖分的积累涉及叶片光合性能,光合产物向根、茎和穗中的分配以及蔗糖在茎秆中的代谢等多个方面,甜高粱生产燃料酒精的原理主要是将茎秆中的糖分转化成燃料乙醇,因此,糖分是甜高粱作为生物质能源作物的物质基础^[6-7],探讨盐胁迫下甜高粱的糖分变化规律成为生物质能源研究的一个重要方面。

蔗糖磷酸合成酶(Sucrose phosphate synthetase, SPS)、蔗糖合成酶(Sucrose synthase, SS)和转化酶(Invertase, INV)^[8]是高等植物中与蔗糖代谢密切相关的酶。SPS 是以鸟苷二磷酸葡萄糖(UDPG)为供体,以 6-磷酸果糖(F-6-P)为受体,合成 6-磷酸蔗糖的糖转移酶(SPP),SPS 和 SPP 是同时作用并以复合体的形式存在于植物体内的,SPS 催化蔗糖合成是一个不可逆的过程^[9-10];SS 既可催化蔗糖合成(蔗糖合成酶合成方向 SS-s 作用),又可催化蔗糖分解(蔗糖合成酶分解方向的 SS-d 作用),通常认为主要是负责蔗糖分解;INV 可催化蔗糖分解为单糖^[11],因其最适 pH 不同可分为酸性转化酶(AI)和中性转化酶(NI)。其中 NI 有可溶性和不可溶性,分别存在于细胞质和细胞壁上。AI 具有调节

果实内糖积累和液泡中蔗糖的作用,部分 AI 可结合在细胞壁上,主要参与韧皮部质外体卸载时蔗糖的分解,以保持库源之间蔗糖的浓度。

本试验分析了不同土壤盐分胁迫下甜高粱茎秆糖分含量的积累规律,确定盐碱地适宜播种的土壤盐分,为生产上利用盐碱地种植甜高粱提供理论依据;同时对盐胁迫下茎秆糖分含量与蔗糖代谢酶活力的相关性进行研究,以期找到影响糖分积累的关键酶,从而为今后利用分子生物学或基因工程手段提高其糖分含量、改善其糖组分提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以甜高粱杂交品种“辽甜 1 号”(由辽宁省农科院创新中心提供)为试验材料。

1.2 试验设计

试验于 2015 年 4—11 月在北方民族大学生物科学与工程学院实践教学基地进行。试验基地在银川市西部,位于东经 $106^{\circ}12'$,北纬 $38^{\circ}50'$ 。区内四季分明、春迟夏短、秋早冬长,昼夜温差大,雨雪稀少,蒸发强烈,气候干燥,风大沙多;年平均气温 8.5°C 左右,年平均日照时数 $2\,800 \sim 3\,000 \text{ h}$,是中国太阳辐射和日照时数最多的地区之一;年平均降水量 200 mm 左右,无霜期 185 d 左右。

试验选用 5 个由 PVC 聚氯乙烯硬质板材塑料焊制而成的防渗漏试验池(长×宽×高: $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$),以当地水稻田土壤和盐碱地土壤为原土,按全盐在土壤中的质量比重调配盐度,经宁夏农林科学院农业资源与环境研究所化验,5 个盐池实测盐分质量分数为:CK(以宁夏银川市西夏区园林场水稻田耕层土壤为对照,实测值 0.102%)、T1 (0.215%)、T2 (0.250%)、T3 (0.300%)、T4 (0.459%),随机排列,重复 3 次,共 15 个盐池。种植规格按条播进行,每池 4 行,每池定植 26 株,左右距池边 0.2 m ,行距 0.53 m ,株距 0.30 m ,播种时施底肥磷酸二铵 1 kg/池 ,拔节期时施尿素 0.5 kg/池 。

于拔节期(07-20)、孕穗期(08-05)、开花期(08-23)、灌浆期(09-05)和成熟期(09-24)取样,测糖含量和相关代谢酶活性。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 糖含量的测定 每个盐池取长势均一植株的第2、4、6茎节(由下至上),每个茎节去皮后称取5 g压汁,记录出汁质量,计算出汁率。取2 mL每茎节汁液共6 mL混匀即为糖样品溶液,取3 mL糖样品溶液,综合改进李桂英等^[12]、贾茹珍等^[13]、胡明方^[14]的方法进行纯化处理。具体方法是:每管各加入0.1 mL亚铁氰化钾溶液I(质量浓度106 g/L)和乙酸锌溶液(22 g乙酸锌+3 mL冰乙酸水微热溶解后,定容至100 mL),4℃下12 000 r/min离心20 min,上清液移至具塞试管(内装0.2 g活性炭)于80℃水浴30 min,冷却后再次离心(条件同上),取上清液稀释2.5倍,取稀释液2 mL经0.45 μm微孔滤膜过滤2次至进样瓶,4℃冰箱中保存待测。每个样品重复3次。

色谱分析条件:系统为安捷伦1200系列,G1326A RID检测器,Agilent Zorbax carbon hydrate Analysis Column(4.6 mm×150 mm,5-Micron);流动相为乙腈/水(体积比为80:20);柱温30℃;检测池温度30℃;流速1.0 mL/min,进样量10 μL,测定果糖、葡萄糖和蔗糖含量。

1.3.2 酶活性的测定 (1)酶液制备。蔗糖合成酶(SS)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)、酸性转化酶(AI)、中性转化酶(NI)酶液的制备,参照郭燕^[15]、Lowell等^[16]的方法。称取0.6 g新鲜去皮甜高粱茎秆于冰浴的研钵中,加入3 mL 100 mmol/L Tris-HCl(pH7.0)提取缓冲液(内含5 mmol/L MgCl₂,2 mmol/L EDTA-Na₂,2%(体积分数)乙二醇,0.2%(质量分数)牛血清清蛋白,2%(质量分数)PVP,5 mmol/L DTT)冰浴研磨提取,4℃、10 000 r/min离心20 min,取上清液3 mL装入透析袋,然后置于透析缓冲液(25 mmol/L Tris-HCl(pH 7.0),2.5 mmol/L MgCl₂,1 mmol/L EDTA-Na₂,1%(体积分数)乙二醇,1 mmol/L DTT)中4℃透析过夜,其间更换透析液3次,所得酶液备用。

(2)酶活性测定。参考郭燕^[15]的方法,其中SPS活性和SS合成方向(SS-s)活性通过480 nm比色,以生成的蔗糖定量;SS分解方向(SS-d)活性通过480 nm比色,以生成的果糖定量;AI和NI活性通过540 nm比色,以生成的葡萄糖定量。

1.4 数据统计与分析

结合回归方程、糖组分图谱峰面积及样品出汁率等指标,参考丛靖宇^[17]的公式计算各取样阶段茎秆糖分。各糖组分相对含量=单位质量茎秆中该糖组分含量/总糖含量×100%。

试验数据采用SPSS(20.0)进行分析,用GraphPad Prism 5.0和Microsoft Excel 2003进行数据处理与作图。

2 结果与分析

2.1 土壤盐胁迫对甜高粱茎秆糖分积累的影响

2.1.1 对总糖的影响 图1表明,甜高粱茎秆总糖含量在生长发育过程中呈逐渐增加的趋势,均在灌浆期达到最大,说明灌浆期是茎秆总糖含量最大的时期。不同程度盐胁迫对甜高粱茎秆总糖含量的影响不同,成熟期T1、T2、T3处理总糖含量大于对照,T4处理小于对照,说明T1~T3处理盐胁迫可以促进总糖的累积,且T2处理总糖含量最大。

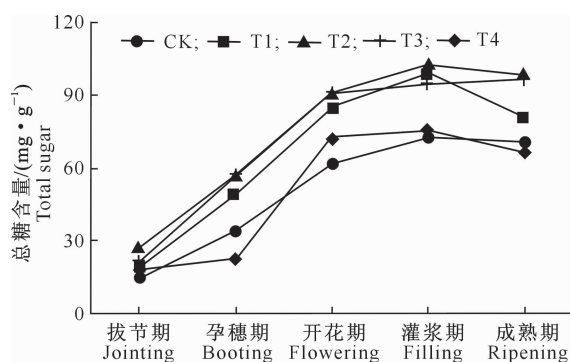


图1 土壤盐胁迫对不同发育时期甜高粱茎秆总糖含量的影响

Fig.1 Effects of soil salt stress on sweet sorghum total sugar content

2.1.2 对果糖、葡萄糖、蔗糖的影响 图2表明,甜高粱茎秆果糖含量在生长发育过程中呈先增加后降低的趋势,开花期达到最大,说明在生长发育前期甜高粱光合同化产物主要以小分子还原糖形式存在,为植株正常生长提供了所需的物质和能量。

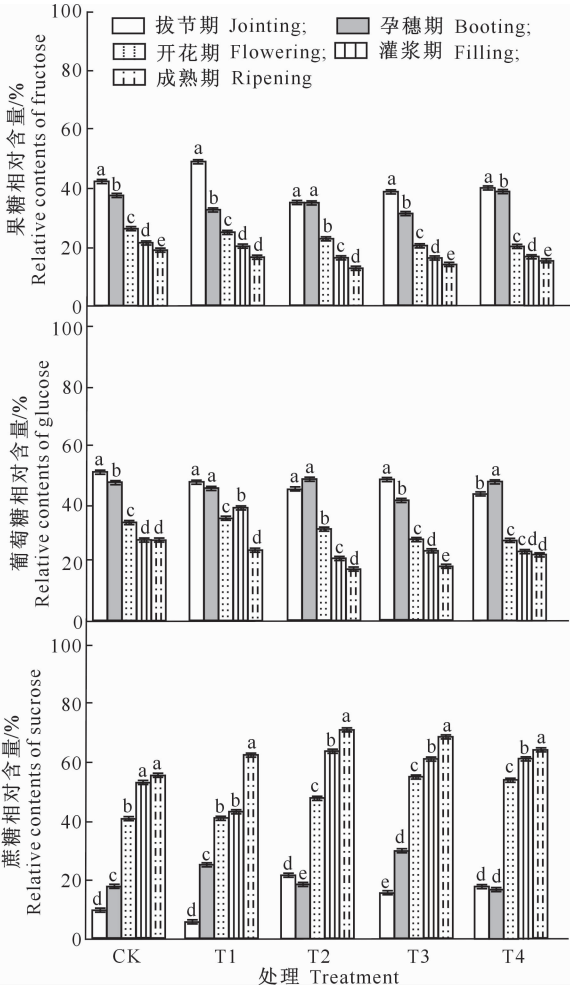
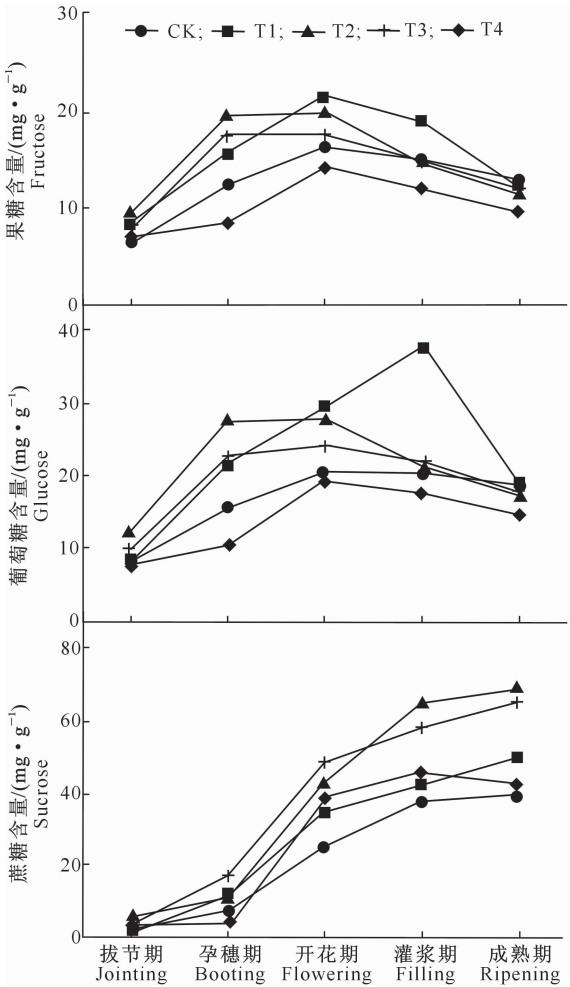
由图2还可以看出,不同程度盐胁迫对果糖含量变化有显著影响,开花期T1、T2、T3处理果糖含量大于对照,而成熟期各处理均低于对照,表明低盐胁迫在灌浆期之前可促进果糖累积,到成熟期则起抑制作用;果糖相对含量结果表明,在甜高粱生长发育过程中,其茎秆中果糖相对含量随着生育进程的推进呈现下降趋势,而盐胁迫对此指标无显著影响。

图2表明,甜高粱茎秆生长发育过程中各处理

葡萄糖含量变化呈倒 V 型趋势,开花期最大(T1 处理除外),成熟期最小;而蔗糖含量则呈现 S 型变化趋势,这可能是由于葡萄糖不仅被植物呼吸作用大量利用,同时也被用来合成蔗糖所致。盐胁迫处理对葡萄糖含量有显著影响,开花前 T1、T2、T3 处理大于对照,而成熟期各处理均低于对照,表明低盐胁迫在开花前可以促进葡萄糖的积累,而在成熟期起抑制作用。葡萄糖相对含量随着生育进程的推进呈现下降趋势,盐胁迫对其无显著影响。

图 2 表明,甜高粱茎秆蔗糖含量在生长发育过

程中呈逐渐增加的趋势,在孕穗期之前较低,孕穗期至开花期迅速增加,于成熟期达最大。盐胁迫对蔗糖含量有显著影响,各处理蔗糖含量均大于对照且于成熟期达到最大,说明蔗糖在成熟期有最大累积,且盐胁迫可促进蔗糖累积,其中以 T2 处理蔗糖含量最高。对蔗糖相对含量的研究表明,甜高粱茎秆蔗糖相对含量在生长发育过程中逐渐增加,T2、T3、T4 处理组均高于对照,说明盐胁迫可提高蔗糖的相对含量。



柱上标不同小写字母表示同一处理不同时期呈显著性差异(P=0.05)

Different lowercase letters show significant difference among different periods (P=0.05)

图 2 土壤盐分胁迫对甜高粱茎秆果糖、葡萄糖、蔗糖及其相对含量的影响

Fig.2 Effects of soil salt stress on contents of sweet sorghum fructose,glucose,and sucrose

2.2 土壤盐分胁迫对甜高粱茎秆蔗糖代谢相关酶的影响

2.2.1 对蔗糖磷酸合成酶活性的影响 SPS 催化 UDPG 与 F-6-P 结合生成磷酸蔗糖,产物被 SPP 捕捉水解成蔗糖。表 1 表明,SPS 活性在甜高粱茎秆

生长发育过程中呈逐渐增加趋势,开花期之前缓慢增加,灌浆期后迅速增加并于成熟期达最大,且同一盐胁迫处理下开花期至成熟期 SPS 活性与拔节期相比总体显著提高,说明在茎秆生长初期 SPS 活性较低,合成蔗糖较少,后期 SPS 活性急剧增加,促进

了蔗糖的累积,这与蔗糖含量反映的规律一致。对不同程度盐胁迫处理而言,同一发育时期内 SPS 活性随胁迫程度加重呈先增加后降低的趋势,但成熟期 T1~T3 处理均显著大于对照,说明盐胁迫促进了 SPS 活性的增加。

表 1 盐分胁迫下甜高粱茎秆蔗糖磷酸合成酶活性的变化规律

Table 1 Variation of SPS activity in sweet sorghum stalks						mg/(g · h)
处理 Treatment	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Ripening	
CK	51.656±6.252 Aa	51.601±4.765 Aa	72.112±5.767 Ba	89.058±4.947 Bac	184.528±6.632 Ca	
T1	52.200±3.253 Aa	66.653±4.590 ABb	75.822±4.931 Ba	112.699±8.460 Cbc	225.170±5.459 Db	
T2	67.089±4.527 Aa	68.113±4.345 Ab	86.985±4.361 Ba	128.434±5.224 Cb	272.986±5.719 Dc	
T3	58.118±6.991 Aa	56.008±4.952 Aab	80.824±4.665 Ba	113.257±5.224 Cbc	237.142±6.342 Db	
T4	49.154±7.527 Aa	46.207±4.701 Aa	73.371±4.761 Ba	97.739±5.156 Cc	146.081±7.497 Dd	

注:不同大写字母表示同一处理不同时期呈显著性差异($P=0.05$);不同小写字母表示同一时期不同处理呈显著性差异($P=0.05$)。下表同。
Note:Different capital letters show significant difference among different periods ($P=0.05$),and different lowercase letters show significant difference among different treatments ($P=0.05$). The same below.

2.2.2 对蔗糖合成酶活性的影响 SS 可催化植物体内糖代谢过程中的果糖和 UDPG 与蔗糖和 UDP 之间相互转化的化学反应,因此 SS 既能合成也能分解蔗糖。表 2 显示,SS-d 活性在甜高粱茎秆生长发育过程中呈逐渐增加趋势,在开花期前较高且基本不变,而随着生长进程的推进呈下降趋势,说明甜高粱茎秆生长初期可能通过 SS-d 分解蔗糖,从而为植株的正常生长发育提供能量,而生长后期活性降低以增加蔗糖的累积;盐胁迫下 SS-d 活性随盐质量分数增大呈现先增高后降低的趋势,灌浆期之前 T1、T2、T3 处理 SS-d 活性均远大于对照(T3 处理除外),成熟期各处理与对照相差无几,说明甜高粱生长发育前期低盐胁迫可促使 SS-d 活性提升。

表 2 显示,SS-s 活性在甜高粱茎秆生长发育过程中呈先增加后降低的趋势,开花期前较低,而随着生长进程的推进,开花期后迅速增加并于灌浆期达最大,而后迅速降低,说明甜高粱茎秆生长发育初期较低的 SS-s 活性能促进蔗糖分解,而灌浆期较高的 SS-s 活性能促进蔗糖的累积。SS-s 活性随盐胁迫程度加重呈先增加后降低的趋势,T1、T2、T3 处理 SS-s 活性均大于对照(拔节期 T3 处理除外),说明低盐胁迫有利于提高 SS-s 活性。

表 2 盐分胁迫下甜高粱茎秆蔗糖合成酶活性的变化规律

Table 2 Variation of SS activity in sweet sorghum stalks							mg/(g · h)
处理 Treatment	指标 Index	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Ripening	
CK	SS-d	86.120±3.608 ACac	100.629±3.164 Ba	107.701±3.056 Ba	91.783±3.141 Aac	81.961±2.346 Ca	
T1		103.851±1.896 ACbc	109.323±1.766 ABb	114.948±2.417 Bab	98.705±2.550 Cab	82.107±0.785 Da	
T2		107.562±4.872 Ab	117.701±2.474 ABb	119.147±3.028 Bb	104.371±3.496 Ab	82.192±1.382 Ca	
T3		94.537±4.207 Ac	113.757±2.713 Bb	111.294±2.283 Bab	90.399±2.366 Aa	79.225±1.645 Ca	
T4		93.091±5.171 ABc	90.646±3.102 ABc	99.604±2.904 Ab	86.544±2.776 BCc	77.229±3.175 Ca	
CK	SS-s	69.676±5.685 Aa	78.280±6.853 Aac	81.866±3.546 Ac	185.337±4.947 Ba	80.605±4.784 Aac	
T1		76.685±8.138 Aa	83.303±3.797 Aabc	90.343±4.671 Aa	199.851±4.915 Bac	89.918±4.35 Babc	
T2		79.032±6.381 Aa	100.727±6.295 Bb	110.460±5.875 Cbc	224.554±4.969 Cbc	96.022±4.590 ABb	
T3		67.199±4.865 Aa	95.413±6.083 BDab	107.427±3.119 Cac	199.575±4.679 Cac	90.065±3.854 Dabc	
T4		61.928±6.682 Aa	67.238±6.120 Ac	75.888±3.930 Bc	174.819±5.626 Bc	75.942±5.268 Ac	

2.2.3 对转化酶活性的影响 转化酶在蔗糖代谢中起重要作用,它能不可逆地催化蔗糖水解为葡萄糖和果糖。表 3 表明,NI 活性在甜高粱茎秆生长发育过程中呈降低趋势,拔节期达最大值,而孕穗期至成熟期较低且各时期基本不变,表明甜高粱茎秆生长前期具有较高的 NI 活性,当茎秆成熟后(即孕穗期至成熟期)NI 活性较低,推测 NI 酶活性可能与茎秆生长有关。不同程度盐胁迫下 NI 活性基本不变,与对照差异不显著,表明盐胁迫对 NI 活性无影响。

表 3 显示,AI 活性在甜高粱茎秆生长发育过程中呈降低趋势,至孕穗期迅速下降,拔节期与其他生长时期差异显著;孕穗期至成熟期缓慢下降且彼此间差异不显著;茎秆生长时期 AI 活性与蔗糖含量变化趋势相反,表明甜高粱生长前期 AI 对分解蔗糖起重要作用,而生长后期随 AI 活性降低,蔗糖分

解逐渐减弱,从而导致蔗糖大量累积。各盐处理 AI 活性均高于对照,且 T1 处理 AI 活性在孕穗期至成熟期显著高于对照,表明盐胁迫促进了 AI 活性的增加。

表 3 盐分胁迫下甜高粱茎秆转化酶活性的变化规律

Table 3 Variation of enzyme activity in stem of sweet sorghum stalks							mg/(g·h)
处理 Treatment	指标 Index	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Ripening	
CK	NI	7.830±0.126 Aa	4.700±0.228 Ba	4.681±0.324 Ba	4.668±0.246 Ba	4.628±0.296 Ba	
T1		8.803±0.158 Aa	4.874±0.269 Ba	4.872±0.267 Ba	4.834±0.116 Ba	4.810±0.170 Ba	
T2		8.665±0.383 Aa	5.146±0.266 Ba	5.139±0.134 Ba	5.034±0.101 Ba	5.004±0.115 Ba	
T3		8.595±0.552 Aa	5.020±0.222 Ba	4.910±0.138 Ba	4.858±0.210 Ba	4.818±0.246 Ba	
T4		8.456±0.326 Aa	4.976±0.142 Ba	4.966±0.122 Ba	4.903±0.100 Ba	4.943±0.176 Ba	
CK	AI	7.098±0.528 Aa	4.764±0.073 Ba	4.681±0.076 Ba	4.579±0.153 Ba	4.130±0.177 Ba	
T1		8.113±0.262 Aab	5.383±0.122 Bb	5.268±0.116 Bb	5.251±0.158 Bb	4.832±0.265 Bb	
T2		8.051±0.411 Aab	5.430±0.246 Bb	5.095±0.155 Bab	5.166±0.212 Bab	4.744±0.156 Bb	
T3		8.068±0.357 Aab	5.041±0.109 Bab	5.065±0.196 Bab	5.012±0.271 Bab	4.665±0.151 Bab	
T4		8.313±0.278 Ab	5.220±0.124 Bab	5.009±0.249 Bab	5.056±0.170 Bab	4.743±0.176 Bb	

2.3 盐胁迫下甜高粱茎秆糖分与蔗糖代谢酶活性的相关性分析

由于 T2 处理甜高粱茎秆总糖含量显著高于其他处理,因此对 T2 处理各指标进行相关性分析,结果见表 4。由表 4 可见,总糖含量与蔗糖含量和 AI 活性呈显著相关,与其他酶活性无显著相关性;果糖

含量与葡萄糖含量呈极显著正相关,SPS 活性与 SS-d 活性呈显著负相关,NI 活性与 AI 活性呈极显著正相关,由此可见,甜高粱茎秆生长发育阶段的糖分累积是各种酶共同作用的结果,其中 AI 是调控甜高粱茎秆总糖积累的关键酶。

表 4 甜高粱茎秆糖分与蔗糖代谢酶活性的相关性

Table 4 Correlation of sweet sorghum stalk sugar contents and sucrose metabolism enzyme activities									
指标 Index	总糖 Total sugar	果糖 Fructose	葡萄糖 Glucose	蔗糖 Sucrose	SPS	SS-d	SS-s	NI	AI
总糖 Total sugar	1								
果糖 Fructose	0.299	1							
葡萄糖 Glucose	0.373	0.996**	1						
蔗糖 Sucrose	0.935*	-0.057	0.021	1					
SPS	0.608	-0.390	-0.311	0.776	1				
SS-d	-0.359	0.686	0.622	-0.626	-0.931*	1			
SS-s	0.592	0.167	0.195	0.561	0.032	-0.005	1		
NI	-0.846	-0.650	-0.712	-0.642	-0.404	0.088	-0.426	1	
AI	-0.892*	-0.561	-0.63	-0.723	-0.521	0.204	-0.378	0.988**	1

注: ** . 在 0.01 水平(双侧)上呈极显著相关; * . 在 0.05 水平(双侧)上呈显著相关。
Note: ** . Correlation is significant at the 0.01 level; * . Correlation is significant at the 0.05 level.

3 结论与讨论

3.1 盐胁迫下甜高粱茎秆糖分的积累特征

甜高粱茎秆中主要的糖分种类为蔗糖、葡萄糖和果糖,以甜高粱茎秆中的糖分为原料生产燃料乙醇是生物质能源开发的一个重要途径。了解甜高粱的糖分含量、组成及其影响因子对开发利用甜高粱生物质能源具有重要意义。本研究发现,在甜高粱生长发育过程中,茎秆中蔗糖含量逐渐增加,于成熟期达到最大;而果糖和葡萄糖含量在生长发育前期较高,于开花期达到最大,后期逐渐降低,这表明生长前期糖分主要通过呼吸代谢被分解,为甜高粱的快速生长提供能量和小分子物质,到生长后期,光合

产物主要以蔗糖形式储存在茎秆中,这与毛鑫等^[18]对 12 种甜高粱茎秆中糖分积累规律和刘洋^[10]对甜高粱茎秆糖分积累关键酶基因的研究结果相一致。本研究还发现,总糖、蔗糖、果糖和葡萄糖含量随盐胁迫程度加重呈先增加后降低的趋势,总糖和蔗糖含量在 T1~T3(盐分质量分数为 0.215%~0.300%)处理下高于对照,且盐胁迫提高了蔗糖的相对含量;而盐胁迫对葡萄糖和果糖的相对含量无影响,说明蔗糖是影响总糖含量的重要因素,且低盐胁迫可促进蔗糖和总糖的累积。

3.2 盐胁迫下甜高粱茎秆蔗糖代谢相关酶的响应特征

植物体内的蔗糖合成主要由 SPS 和 SPP 的两

步反应形成,SPS 是蔗糖合成途径中重要的调节酶,转化酶和蔗糖合成酶是植物中已知的可以催化蔗糖分解的酶,其中蔗糖转化酶能不可逆地催化蔗糖水解为葡萄糖和果糖^[19]。本研究结果表明,甜高粱生长前期茎秆中 SPS、SS-s 活性较低,随着生长发育进程推进,SPS、SS-s 活性逐渐增大,且低盐胁迫使 SPS、SS-d、SS-s、AI 酶活性增加,而对 NI 活性无显著影响。谢鸣等^[20]在杨梅和乔永旭等^[21]在甜瓜上的研究提出,转化酶活性较高时蔗糖很难积累,这与本研究结果相一致。相关性分析显示,甜高粱蔗糖含量与 SPS 活性无显著相关性,这与 Zhu 等^[22]关于“茎秆中 SPS 酶活性与蔗糖含量没有明显相关性”的研究结果相一致;总糖含量与蔗糖含量和 AI 活性呈显著相关,而与其他酶无显著相关性,说明 AI 是调控甜高粱茎秆总糖积累的关键酶。

综上所述,土壤盐分高低对甜高粱茎秆糖分含量和组成均有显著影响,土壤质量分数小于0.300%时,土壤盐胁迫有助于甜高粱茎秆总糖的累积。不同土壤盐分胁迫对甜高粱蔗糖代谢相关酶活性也有很大影响,土壤盐分为0.215%~0.300%时可提高茎秆蔗糖、总糖含量和 SPS、SS、AI 活性,甜高粱生长发育各阶段茎秆糖分的累积是各种酶共同作用的结果,其中 AI 是调控甜高粱茎秆总糖的关键酶。

[参考文献]

- [1] 戴凌燕.甜高粱苗期对苏打盐碱胁迫的适应性机制及差异基因表达分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2012.
Dai L Y. Study on adaptive mechanisms and expression analysis of different genes of sweet sorghum seedlings under saline-alkali stress [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012.
- [2] 王越,赵辉,马凤江,等.盐碱地与耐盐碱牧草[J].山西农业科学,2006,34(1):55-57.
Wang Y, Zhao H, Ma F J, et al. Alkali-saline soil and alkali-hardiness forage [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2006, 34(1): 55-57.
- [3] 祁栋灵,郭桂珍,李明哲,等.水稻耐盐碱性生理和遗传研究进展[J].植物遗传资源学报,2007,8(4):486-493.
Qi D L, Guo G Z, Li M Z, et al. Progress of physiological and genetic on saline-alkaline tolerance in rice [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(4): 486-493.
- [4] 邹剑秋,宋仁本,卢庆善.新型绿色可再生能源作物:甜高粱及其育种策略[J].杂粮作物,2003,23(3):134-135.
Zou J Q, Song R B, Lu Q S. A new green renewable energy crop-sweet sorghum and its breeding tactics [J]. Rain Fed Crops, 2003, 23(3): 134-135.
- [5] 沈飞,刘荣厚.甜高粱糖分积累规律及其酒精发酵的研究

[J]. 农机化研究,2007(2):149-152.

Shen F, Liu R H. The sugar accumulation of sweet sorghum and its stalk juice ethanol fermentation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(2): 149-152.

- [6] 梅晓岩,刘荣厚.中国甜高粱茎秆制取乙醇的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(5):341-345.
Mei X Y, Liu R H. Present situation of ethanol production from sweet sorghum stalk in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(5): 341-345.
- [7] 吉春容,邹陈,再吐尼古丽·库尔班,等.不同播期下甜高粱含糖量变化及其与气象因子的关系[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(3):62-66.
Ji C R, Zou C, Kuerban Z, et al. Change of sugar contents and its relationship with meteorological factors among different sowing dates of sweet sorghum [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013, 7(3): 62-66.
- [8] 张明方,李志凌.高等植物中与蔗糖代谢相关的酶[J].植物生理学通讯,2002,38(3):289-295.
Zhang M F, Li Z L. Sucrose-metabolizing enzymes in higher plants [J]. Plant Physiology Journal, 2002, 38(3): 289-295.
- [9] 李永庚,于振文,姜东,等.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, et al. 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 Agronomica Sinica, 2001, 27(5): 658-664.
- [10] 刘洋.甜高粱茎秆糖分积累关键酶基因克隆及功能标记开发[D].北京:中国农业科学院,2009.
Liu Y. Cloning of genes of the key enzymes involved in sugar accumulation sweet and development of functional markers in sweet sorghum [J]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [11] 杨明,刘丽娟,李莉云,等.甜高粱蔗糖合酶表达与蔗糖积累的相关分析[J].作物学报,2009,35(1):185-189.
Yang M, Liu L J, Li L Y, et al. Correlation analysis between sucrose synthase expression and sucrose accumulation in sweet sorghum [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1): 185-189.
- [12] 李桂英,岳美琪,叶凯,等.甜高粱茎秆汁液锤度与可发酵糖含量的关系[J].核农学报,2013(7):969.
Li G Y, Yue M Q, Ye K, et al. Relationship between srix value and fermentable sugar content in sweet sorghum juice [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013(7): 969.
- [13] 贾茹珍,张春红.甜高粱秆汁储藏方法的研究[J].食品工业科技,2008(6):275.
Jia R Z, Zhang C H. Research on storage methods of juice of sweet sorghum stem [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(6): 275.

(下转第56页)