

30 个甜高粱品种糖产量与氮素利用特性

吴秋平¹, 袁翠平¹, 姜文顺¹, 池云花², 刘鹏¹, 董树亭¹, **王空军**¹

(¹作物生物学国家重点实验室/山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; ²中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要:【目的】探讨不同甜高粱品种糖产量的差异及其与干物质生产分配及氮素利用的关系。【方法】在充分发挥个体生产潜力条件下(大田种植密度 15 000 株/ha), 采用聚类分析、相关分析及通径分析的方法, 对国内外 30 个甜高粱品种抽穗期和成熟期干物质积累分配及成熟期氮素利用特性进行研究。【结果】依据成熟期整株糖产量进行聚类分析, 供试品种划分为早熟低产型、早熟中产型、中熟较高产型和晚熟高产型 4 类, 其中高产型仅占 23.3%。与中产和低产型相比, 高产型甜高粱品种植株含氮量低, 尤其叶片和茎秆 N% 明显降低, 含糖量与植株 N% 负相关(-0.592**), 是高产甜高粱品种维持较高含糖量的重要原因。高产型甜高粱品种氮在器官间分配比例为茎秆>叶片>穗, 与成熟期物质分配表现一致, 有利于获得高茎秆生物量, 同时保障叶源量大、叶片光合同化物供应能力较强。相关分析和通径分析表明, 干物质积累量、氮素糖产量生产效率与糖产量均呈极显著正相关, 且二者对糖产量都起正直接作用, 含氮量则表现相反, 对糖产量起负作用。【结论】高糖产量甜高粱品种特征为: 在较高含糖量基础上, 氮素优先分配给茎秆, 显著提高茎秆生物量。高生物量、高氮素糖产量生产效率和低含氮量, 可作为选择高产甜高粱的重要衡量指标。

关键词: 甜高粱; 糖产量; 干物质生产; 氮素生产效率; 聚类分析; 通径分析

Characteristics of Nitrogen Utilization and Sugar Yield of 30 Sweet Sorghum Varieties

WU Qiu-ping¹, YUAN Cui-ping¹, JIANG Wen-shun¹, CHI Yun-hua², LIU Peng¹, DONG Shu-ting¹, **WANG Kong-jun**¹

(¹State Key Laboratory of Crop Biology/Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong;

²Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

Abstract: 【Objective】 The difference of soluble sugar yield between different sweet sorghum varieties was discussed to reveal the relationship between sugar yield (SY) with dry matter production and nitrogen utilization of different sweet sorghum varieties. 【Method】 Thirty sweet sorghum varieties were randomly cultivated at a low density of 15 000 plant/ha. Clustering analysis, correlation analysis and path analysis were used to analyse dry matter (including stem, leaf and sheath, ear) production per plant at both heading and maturing stages, as well as nitrogen utilization among different organs at maturing stage. 【Result】 Through hierarchical cluster analysis of sugar yield per plant, the tested sweet sorghum varieties were sorted into 3 types, i.e., low-SY with short duration, mediate-SY with short duration, high-SY with mediate duration and high-SY with long duration, with high-SY type accounted for only 23.3% of the tested varieties. Results showed that, nitrogen content was significantly lower in high-SY type, especially in stalk and leaf and sheath, as compared to the low and mediate types, which benefited its high sugar content to some extent because of the reverse correlation between sugar content and nitrogen content (-0.592**). As for nitrogen partition between various organs for high-SY type, largest proportion of nitrogen was distributed to stalk preferentially, followed with leaf and sheath, with panicle took the least participation in nitrogen accumulation, with a similar tendency of the dry matter partition of various organs, that contributed to obtaining high stalk biomass and ample leaf area to providing enough photosynthetic assimilate. Results of both correlation analysis and path analysis indicated that the correlation coefficients between SY with the dry matter accumulation

收稿日期: 2007-12-25; 接受日期: 2008-05-23

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0603), 教育部长江学者与创新团队发展计划(IRT0635), 国家“973”项目(2007CB106804)和山东省博士后创新专项基金(200702014)

作者简介: 吴秋平(1981—), 女, 山东平度人, 硕士, 研究方向为作物高产生理生态。E-mail: wqp19810930@163.com。通讯作者董树亭(1953—), 男, 山东诸城人, 教授, 研究方向为玉米生理生态。Tel: 0538-8245838; E-mail: stdong@sdau.edu.cn。通讯作者王空军(1968—2008), 山东章丘人, 教授, 研究方向为作物生理生态。

and nitrogen productivity efficiency for SY was significantly positive; further these two items exerted direct effect on SY. However, nitrogen content of whole plant had a negative effect on SY, i.e., the higher nitrogen content the lower SY obtained. **【Conclusion】** Increased dry matter productivity especially in stalk with a relatively high sugar concentration, meanwhile, sustaining a relative low plant nitrogen level and high nitrogen productivity efficiency for sugar yield are the primary characteristics of sweet sorghum varieties aimed for producing high sugar yield.

Key words: Sweet sorghum; Sugar yield; Dry matter production; Nitrogen efficiency; Cluster analysis; Path analysis

0 引言

【研究意义】随着化石能源的日渐匮乏和环境污染日趋严重,生物质能源作为可再生的洁净能源,具有替代化石燃料、减少温室气体排放和支持农业发展等优势,已越来越受重视^[1-3]。甜高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]为短日照 C₄植物,生长能力特别强,有“高能作物”之称,其酒精产量每公顷可达 6t,比甘蔗高 30%,比玉米高 3 倍,抗逆性强,适应范围广,被认为是生物能源系统中有力的竞争者^[4-5]。发展甜高粱种植对推进中国现阶段以“非粮”原料为主的生物质能源工程,保障能源、粮食和环境安全具有重要意义^[2,6]。**【前人研究进展】**植株干物质生产量及其在各器官的分配是影响产量的关键因素^[7-8]。与粒用高粱和饲用高粱相比,甜高粱茎秆含糖量高,生育后期物质积累速率快,不同高粱类型间物质分配存在差异^[9-12]。氮素是植物生长必需的大量元素之一。作物基因型在吸收利用氮素方面存在极大的差异^[13-15],尤其对于需氮量较大的作物如玉米、高粱等,充分挖掘作物自身对氮素吸收利用的潜力,是合理利用资源、减少环境污染和劳力投入的重要途径之一^[15-16]。Amaducci 等^[17]

研究认为,增施氮磷肥对甜高粱和纤维高粱茎秆蔗糖含量影响较小,但均极显著提高茎秆产量和总生物量,且甜高粱叶片在施肥后增加更明显。Gardner 等^[18]认为不同高粱品种由于遗传基础和进化差异使其氮素利用效率存在显著差异,这可能与不同茎秆组成特性、物质生产分配相关。茎秆生物量与茎秆纤维素和半纤维素含量显著负相关。**【本研究切入点】**中国甜高粱资源丰富^[19],但对甜高粱的研究起步较晚,有关其栽培生理研究亦相对薄弱^[20]。关于不同基因型甜高粱糖产量差异与其氮吸收利用特性的研究鲜见报道。**【拟解决的关键问题】**本研究选用国外引进优良甜高粱品种和国内地方主要栽培品种共 30 个,其锤度均在 13% 以上。高肥力大田条件下,采用 15 000 株/ha 密度以充分发挥品种个体生产潜力,比较研究不同基因型甜高粱的物质及氮素积累分配特性,旨在探明甜高粱品种的单株糖产量差异及其与氮吸收利用的关系,以期甜高粱高效育种及高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

试验选用 30 个甜高粱品种(表 1),其中中国地

表 1 供试甜高粱品种名称、来源及代号

Table 1 Germplasm resources and the code of sweet sorghum varieties in the experiment

代号 Code	品种名称 Variety	来源 Resource	代号 Code	品种名称 Variety	来源 Resource
1	甜芦粟(繁昌) TLS(FC)	安徽 Anhui	16	Early Sumac	美国 U.S.A
2	散穗甜高粱 SSTGL	辽宁 Liaoning	17	Rox Orange	美国 U.S.A
3	甜高粱(宿松) TGL(SS)	安徽 Anhui	18	Italian	澳大利亚 Australian
4	甜高粱(歙县) TGL(XX)	安徽 Anhui	19	Brawley	美国 U.S.A
5	甜芦粟(巢县) TLS(CX)	安徽 Anhui	20	Sumac	美国 U.S.A
6	糖高粱(怀仁) TGL(HR)	山西 Shanxi	21	Radar	澳大利亚 Australian
7	甜秆秫秫(泗县) TGSS(SX)	安徽 Anhui	22	Sugar Drip	美国 U.S.A
8	甜高粱(肇东) TGL(ZD)	黑龙江 Heilongjiang	23	Roma	美国 U.S.A
9	甜高粱(灵丘) TGL(LQ)	山西 Shanxi	24	Cowley	美国 U.S.A
10	甜高粱(大宁) TGL(DN)	山西 Shanxi	25	Rio	美国 U.S.A
11	甜到稍(定远) TDS(DY)	安徽 Anhui	26	Ramada	美国 U.S.A
12	甜高粱(平陆) TGL(PL)	山西 Shanxi	27	M81E	美国 U.S.A
13	甜高粱(万荣) TGL(WR)	山西 Shanxi	28	Smith	美国 U.S.A
14	甜高粱(永济) TGL(YJ)	山西 Shanxi	29	Honey	美国 U.S.A
15	Honey Drip	美国 U.S.A	30	Sart	美国 U.S.A

方品种 14 个, 国外引进品种 16 个 (由中国农业科学院作物科学研究所提供, 锤度均在 13% 以上)。

1.2 试验设计

试验于 2006~2007 年在山东农业大学玉米科技园进行, 试验地为砂质壤土, 土壤 0~20 cm 耕层含有有机质 11.3 g·kg⁻¹、全氮 0.7 g·kg⁻¹、碱解氮 57.02 g·kg⁻¹、速效磷 25.7 g·kg⁻¹、速效钾 106.0 g·kg⁻¹。种植密度为 1.5×10⁴ 株/ha (行距 0.67 m, 株距 1.00 m), 夏播, 以充分发挥个体生产潜力, 小区面积为 33.5 m², 采用完全随机区组试验设计, 重复 3 次。生育期内给予良好管理。

1.3 取样与测定方法

于抽穗期和生理成熟期(穗上中部籽粒黑层出现, 基部达乳熟末期), 每小区取 3 株, 分成茎秆、叶片(含叶鞘)、穗 3 部分, 105℃ 杀青 0.5 h, 80℃ 烘至恒重, 分别称重, 计算各器官干物质积累分配; 样品经粉碎后过 60 目筛, 采用蒽酮比色法测可溶性糖含量^[21], 以计算糖产量, 采用凯氏定氮法测植株各器官含氮量, 并计算氮素吸收与生产效率^[22]。

总氮素积累量 (total nitrogen accumulation, TNA) = 成熟期整株 (茎秆、叶片和穗) 氮素积累量的总和。

氮素干物质生产效率 (nitrogen dry matter production efficiency, NDMPE) = 整株干物质重/整株氮素积累总量。

氮素糖产量生产效率 (nitrogen sugar yield production efficiency, NSYPE) = 整株可溶性糖产量/整株氮素积累总量。

糖氮比 (ratio of sugar content to nitrogen content, RSCNC) = 植株含糖量/含氮量。

单位生长积温产糖量 (ratio of sugar yield per plant to total growing degree days at maturity) = 整株可溶性

糖产量/生育期总积温。其中, GDD^[22] (growing degree days) = $\sum_{i=N_1}^{N_2} \left(\frac{T_{Max} + T_{Min}}{2} - T_{Base} \right)$, N₁、N₂ 分别为生育

期开始与结束的日期; T_{MAX}: 日最高气温; T_{MIN}: 日最低气温; T_{BASE}: 高粱生长基点温度, 本文取 13℃^[12,23]。

1.4 数据处理与统计分析

用 Microsoft Excel 2003 进行数据计算, 用 SPSS11.0 统计分析系统软件方差分析、相关和途径分析, 用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 糖产量和单位生长积温产糖量的聚类分析

对成熟期供试 30 个品种的单株糖产量和生育期两个指标进行聚类分析, 结果表明 (表 2), 供试 30 个品种被明显划分为 4 类: 第 I 类为早熟低产型, 包括 8 个品种; 第 II 类为早熟中产型, 包括 8 个品种; 第 III 类为中熟较高产型, 包括 7 个品种; 第 IV 类为晚熟高产型, 包括 7 个品种。其中, 与第 I 类相比, 第 II 类糖产量增加主要是其含糖量显著提高, 茎秆生物量差异较小; 与第 II 类相比, 第 III、IV 类糖产量的增加, 主要由于其生育期延迟获得较高茎秆生物量, 而含糖量类型间差异不显著, 且略有降低趋势。同时, 随品种糖产量增加, 单位生长积温产糖量亦明显增加, 类型间差异显著。综合 4 类甜高粱品种, 中产和中高产品种占供试品种的比例较大, 高产型仅占 23.3%, 且多为国外引进品种, 说明国内甜高粱高产育种具有很大的空间。

2.2 不同糖产量型甜高粱品种物质积累分配

2.2.1 抽穗期 由图 1 看出, 随品种糖产量增加, 抽穗期茎秆、叶片和穗各器官干物质积累量均呈明显增

表 2 不同甜高粱品种糖产量及其产量构成因素的聚类结果

Table 2 Results of cluster analysis of sugar yield per plant and sugar yield components of different sweet sorghum varieties

类别 Cluster	品种代号 Code of variety	品种数 Number of varieties	类平均 Mean of cluster					
			糖产量 Sugar yield (g/plant)	成熟期 Maturity (d)	含糖量 Sugar content (%)	茎秆干重 Stalk dry weight (kg/plant)	茎秆鲜重 Stalk fresh weight (kg/plant)	单位生长积温产糖量 Ratio of SY per plant to total GDD (g·plant ⁻¹ ·°C ⁻¹ ·d ⁻¹)
I	1~8	8	54.98 d	80.9 c	18.86 b	0.31 b	1.21 c	0.050 c
II	9、10、12、15~19	8	142.07 c	82.6 c	42.66 a	0.34 b	1.78 bc	0.125 b
III	11、13、14、20~22、25	7	232.85 b	100.9 b	42.75 a	0.55 b	2.44 b	0.182 b
IV	23、24、26~30	7	482.85 a	136.6 a	39.47 a	1.23 a	5.38 a	0.316 a

同一列中相同字母表示 5% 水平差异不显著

The same letters at the same column indicate no significance at 5% level

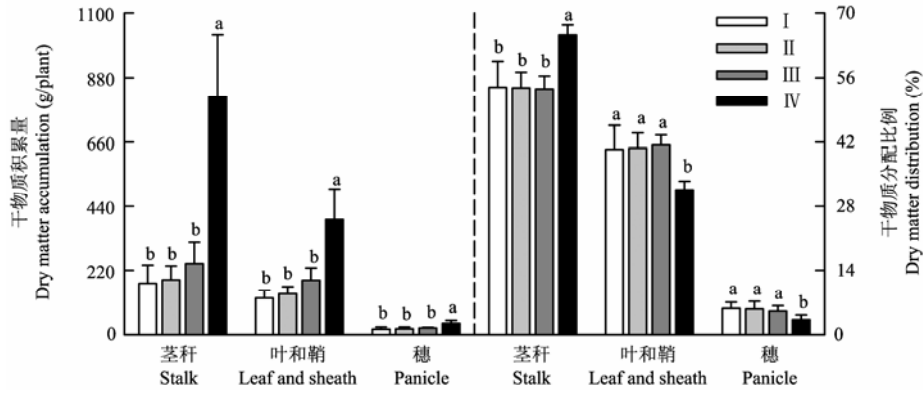


图1 抽穗期不同糖产量型甜高粱品种各器官干物质积累分配

Fig. 1 Accumulation and proportion of dry matter of various organs with different sugar yield types of sweet sorghum varieties at heading stage

加趋势，第IV类均显著高于第I、II和III类，后3类间差异不显著；各器官干物重占整株干物重的比例，各类型均表现为：茎秆>叶片>穗，其中，茎秆所占比例为第IV类显著大于第I、II和III类，叶片和穗所占比例却表现与茎秆相反趋势，均以第III类显著低于第I、II类。与中产型和低产型相比，高产型甜高粱品种抽穗期即具有较高物质积累能力，茎秆分配比例高，叶片和穗所占比例低。

2.2.2 成熟期 随品种糖产量增加，茎秆和叶片干物

质积累明显提高，类型间表现与抽穗期相似趋势，穗干物质积累量类型间差异较小，仅第IV类显著高于第II类。植株各器官干物重占整株干物重的比例类型间差异显著：茎秆为第IV类显著高于第III类，第III类显著高于第II类，后者又显著高于第I类；穗所占比例则表现趋势与茎秆相反，仅第II和III类间差异未达显著水平；叶片所占比例类型间差异较小（图2）。不同类型间植株各器官所占比例表现不同：第I类为茎秆>穗>叶片，第II和III类为茎秆>穗≈叶片，第

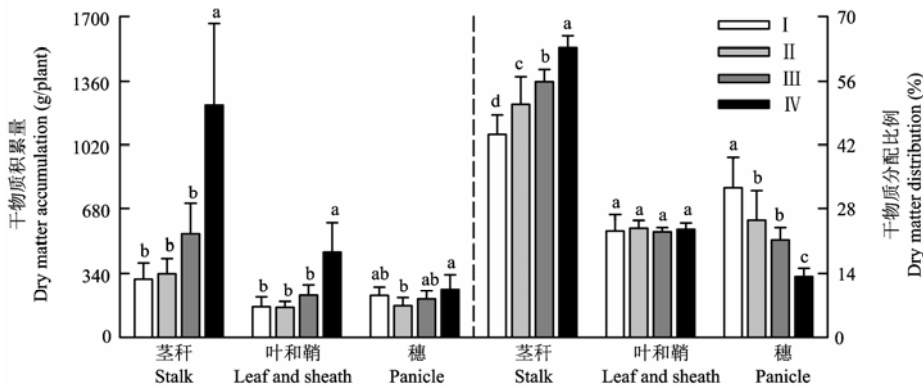


图2 成熟期不同糖产量型甜高粱品种各器官干物质积累分配

Fig. 2 Accumulation and proportion of dry matter of various organs with different sugar yield types of sweet sorghum varieties at maturing stage

IV类为茎秆>叶片>穗。

2.3 不同糖产量型甜高粱品种氮素积累与分配

不同甜高粱品种各器官含氮量存在显著差异（图3-A），茎秆含氮量除第I类显著高于第III类外，其它类型间差异较小；叶片含氮量以第I、II和III类分

别显著高于第IV类，茎秆和叶片含氮水平有降低趋势；穗含氮量则第I与第IV类、第II与第III类均差异较小，但前两类均显著高于后两类。第IV类整株含氮量分别是第I、II和III类的73.1%、83.8%和90.7%。

各类型间茎、叶的氮积累量分别表现与成熟期茎、

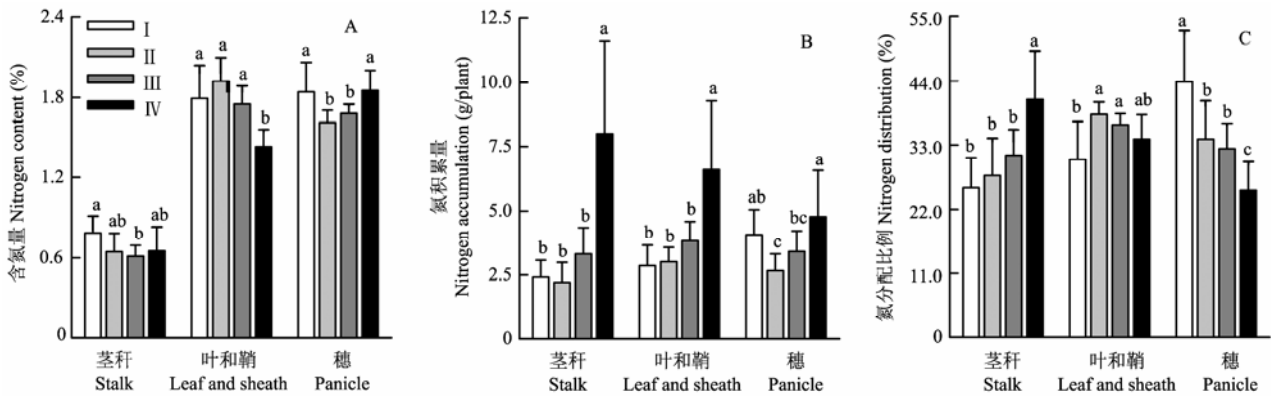


图 3 成熟期不同糖产量型甜高粱品种各器官 (A: 含氮量, B: 氮积累量和 C: 氮分配比例)

Fig. 3 Nitrogen content (A), nitrogen accumulation (B) and its distribution (C) in various organs of different sugar yield types of sweet sorghum varieties at maturing stage

叶干物质积累量一致趋势 (图 3-B), 穗的氮积累量则第 II 类显著低于第 I 和第 IV 类, 第 III 类显著低于第 IV 类, 这与第 II、III 类籽粒含氮量和生物量都较低有关。各类型不同器官的氮分配比例与成熟期各类型间物质分配不同, 茎秆表现为第 I ~ III 类差异较小, 但均显著低于第 IV 类; 穗则以第 IV 类显著低于第 II、III 类, 第 II、III 类低于第 I 类, 差异显著; 叶片氮分配比例除第 I 类显著低于第 II ~ IV 类外, 其它各类差异不显著 (图 3-C)。类型内氮在各器官的分配比例: 第 IV 类为茎秆 > 叶片 > 穗, 与成熟期物质分配一致; 第 III 类为叶片 > 穗 ≈ 茎秆; 第 II 类为叶片 > 穗 > 茎秆, 第 I 类则是穗 > 叶片 > 茎秆。

2.4 影响甜高粱品种糖产量的主要指标

表 3 为 30 个甜高粱品种成熟期糖产量与含糖量、干物质积累量及植株氮素利用指标间的相关性。糖产量除与成熟期植株含氮量极显著负相关外, 与含糖量、干物质积累量、TNA、NDMPE、NSYPE 和糖氮比值均呈线性正相关, 达极显著水平。植株总干物质积累量与含氮量极显著负相关, 与 TNA、NDMPE、NSYPE 则极显著正相关; 含氮量与各指标间都呈负相关, 达显著或极显著水平, TNA 仅与干物质积累量和 NDMPE 达极显著正相关, 说明植株含氮量高不利于甜高粱糖含量及生产效率的提高。

各指标与糖产量的通径分析 (表 4) 表明, 各指标对糖产量的直接通径系数按绝对值从大到小排序为: 干物质积累量 > TNA > NDMPE > NSYPE > 含氮

表 3 不同甜高粱基因型成熟期糖产量与含糖量、干物质积累量及其含氮特性的相关性

Table 3 Correlation coefficients between sugar yield and sugar content, dry matter accumulation and various nitrogen indices with sugar yield at maturity

项目	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	y
Item	含糖量	干物质	含氮量	氮积累量	氮素干物质生产效率	氮素糖产量生产效率	糖氮比	糖产量
	Sugar content (%)	Dry matter (g/plant)	N content (%)	TNA (g/plant)	NDMPE (g·g ⁻¹)	NSYPE (g·g ⁻¹)	RSCNC	Sugar yield (g/plant)
x ₁	1							
x ₂	0.158	1						
x ₃	-0.592**	-0.567**	1					
x ₄	0.035	0.970**	-0.374*	1				
x ₅	0.525**	0.577**	-0.976**	0.368*	1			
x ₆	0.850**	0.499**	-0.887**	0.325	0.861**	1		
x ₇	0.941**	0.336	-0.814**	0.163	0.776**	0.967**	1	
y	0.441*	0.945**	-0.704**	0.872**	0.698**	0.732**	0.597**	1

*和**分别表示 5%和 1%的显著水平

* and ** indicate significance at 5% and 1% probability levels, respectively

表 4 成熟期含糖量、干物质积累量及其各氮素指标对糖产量的途径分析

Table 4 Path analysis between sugar content, dry matter accumulation and various nitrogen indices to sugar yield at maturity

Path	直接作用 Direct effect	间接作用 $x_i \rightarrow x_j \rightarrow y$ Indirect effect						
		总的	$\rightarrow x_1$	$\rightarrow x_2$	$\rightarrow x_3$	$\rightarrow x_4$	$\rightarrow x_5$	$\rightarrow x_6$
		Total	含糖量 Sugar content (%)	干物质 Dry matter (g/plant)	含氮量 N content (%)	氮积累量 TNA (g/plant)	氮素干物质生产效率 NDMPE ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	氮素糖产量生产效率 NSYPE ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
$x_1 \rightarrow y$	-0.132	0.573		0.361	0.141	-0.046	-0.465	0.582
$x_2 \rightarrow y$	2.292	-1.348	-0.021		0.135	-1.293	-0.510	0.342
$x_3 \rightarrow y$	-0.238	-0.465	0.078	-1.299		0.498	0.864	-0.608
$x_4 \rightarrow y$	-1.332	2.205	-0.005	2.224	0.089		-0.326	0.222
$x_5 \rightarrow y$	-0.885	1.583	-0.069	1.322	0.232	-0.491		0.590
$x_6 \rightarrow y$	0.685	0.048	-0.112	1.143	0.211	-0.432	-0.762	

量 > 含糖量, 绝对值越大, 说明对糖产量的直接影响越大。其中, 整株干物质积累量和 NSYPE 的直接作用均大于其总的间接作用, 与相关系数表现一致; 含糖量、TNA、NDMPE 则表现正间接作用大于负直接作用, 主要是它们分别通过干物质积累量和 NSYPE 的正间接效应较大所致, 含氮量的直接及总的间接效应均表现负值, 但通过干物质积累量和 NSYPE 的负间接效应大于自身的直接效应。可见, 较高含糖量、TNA 和 NDMPE 对糖产量本质上存在负作用, 但由于它们与干物质积累量和 NSYPE 呈极显著正相关, 使其总的间接作用远大于自身直接作用, 结果表现与糖产量显著正相关。干物质积累量、NSYPE 和含氮量与糖产量存在真实一致的相关性, 是影响糖产量的重要参考指标。

3 讨论

甜高粱是一种“双库型”作物, 抽穗后茎秆糖分迅速积累, 茎和穗干重同步增长^[23]。深入研究不同基因型尤其是高产型甜高粱品种营养生长和生殖生长阶段茎和穗两种经济器官的物质积累分配特性, 有助于推进甜高粱高产育种与栽培技术的发展。本研究在高肥力大田条件下, 采用 15 000 株/ha 的低密度种植, 以充分发挥品种个体生产潜力, 探讨了 30 个甜高粱基因型糖产量在干物质生产和氮素利用特性差异的生理基础。

甜高粱生育期间以茎为生长中心的时间长, 茎干物质分配率高, 穗发育相对较晚^[23]。粒用高粱杂交种子粒产量高于优良常规种主要由于光合产物在不同器官间转移率增加使子粒经济系数提高^[24]。本研究表 明, 早熟中产型品种较早熟低产型糖产量提高, 主要由于其含糖量明显提高, 生物量差异较小; 较中产型

和中高产型, 高产型品种糖产量提高则是在保持较高含糖量基础上, 各生育时期各器官干物质均显著提高, 同时, 光合同化物以茎为主要分配中心, 穗物质分配比例相对降低, 因而获得高地上生物量, 这可能与试验中高产型品种抽穗及成熟期较晚有关^[25-26]。高产品种其单位生长积温的产糖量亦明显增加(表 2), 说明在高产品种改良过程中其光温生产效率亦明显改善, 在光温资源较充足地区可尽量选用较长生育期甜高粱品种种植, 获得高产高效。因此, 高产型甜高粱品种糖产量提高是在维持较高含糖量基础上, 扩大了茎秆和子粒库容量, 相对减少光合产物向子粒的分配比例, 增加茎秆的干物质分配比例。

氮素营养的研究多集中在小麦、玉米、水稻等作物上^[27-29], 针对甜高粱的研究相对较少。已有研究表明, 不同高粱基因型其整个生长过程氮素吸收动态无明显差异, 但品种间氮素分配不同^[12,30-31]。本研究表 明, 随品种糖产量提高, 植株含氮水平明显降低, 其中早熟中产型主要是通过其籽粒含氮量的显著降低, 高产型则主要通过降低了叶片含氮量, 其次是茎秆含氮量, 实现整株水平上的低含氮水平。由于含氮量与糖含量、干物质积累量均存在极显著负相关(表 3), 且含氮量对糖产量起负直接作用(表 4), 说明甜高粱品种保持低含氮量, 尤其是茎叶含氮量低, 是获得较高含糖量的重要生理原因^[32]。早熟中产型较早熟低产型叶片氮分配比例显著增加, 穗氮分配比例则显著降低, 这可能是其植株维持较高叶片功能期、增加茎秆内碳水化合物积累, 获得高含糖量的重要原因。与中产和中高产型相比, 高产甜高粱品种茎秆氮分配显著提高, 而穗氮分配比例明显降低, 说明高产型品种能较好的协调茎秆和穗两个库的氮需求关系, 获得高茎秆生物量同时维持较低植株含氮水平; 高产型叶片

氮分配比例仍较穗氮分配比例高, 是叶源量大和光合能力较强的重要保障。不同甜高粱品种糖产量与其干物质积累量和氮素糖产量生产效率均呈极显著正相关(表 3), 且二者对糖产量的直接和间接影响较大(表 4), 这可作为高产育种的选择指标。Gardner^[17]等研究认为, 氮胁迫下氮素物质生产效率高的品种茎秆产量仍较高, 子粒生产力则明显较低, 本研究中 7 个早熟中产型甜高粱品种与其表现一致, 对高产型品种而言, 其糖产量和氮素糖产量生产效率显著提高的同时, 高产型品种子粒产量也显著增加, 这可能与高产型品种具有较强氮素积累能力和较高光温生产效率有关。

4 结论

(1) 高产型甜高粱品种的基本特点为: 在较高含糖量基础上, 各生育期不同器官干物质和氮素积累能力都较高, 叶片和茎秆含氮量低, 穗含氮量较高; 高产型甜高粱品种植株内氮素分配比例表现为: 茎秆 > 叶片 > 穗; (2) 干物质积累量、氮素糖产量生产效率和含氮量与成熟期糖产量存在真实一致相关性, 加强选择高生物量和高氮素糖产量生产效率, 低含氮量的植株可作为选育高糖产量甜高粱品种的重要参考指标。

致谢: 中国农业科学院作物科学研究所提供本试验所用甜高粱品种。

References

- [1] Reddy B V S, Ramesh S, Reddy P S, Ramaiah B, Salimath P M, Kachapur R. Sweet sorghum-A potential alternate raw material for bio-ethanol and bioenergy. *International Sorghum and Millets Newsletter*, 2005, 46: 79-86.
- [2] 黎大爵. 开发甜高粱产业, 解决能源、粮食安全及三农问题. 中国农业科技导报, 2004, 6(5): 55-58.
Li D J. Developing sweet sorghum industry to resolve the problems of food and energy security and agriculture in China. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2004, 6(5): 55-58. (in Chinese)
- [3] 卢庆善. 甜高粱研究进展. 世界农业, 1998, (5): 21-23.
Lu Q S. Research progress on sweet sorghum. *World Agriculture*, 1998, (5): 21-23. (in Chinese)
- [4] 康志河, 杨国红, 杨晓平, 王春义, 鹿占磊, 陈军平. 发展甜高粱生产 开创能源农业新时代. 中国农学通报, 2005, 21(1): 340-348.
Kang Z H, Yang G H, Yang X P, Wang C Y, Lu Z L, Chen J P. Developing sweet sorghum production, inaugurating the new age of the energy agriculture. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(1): 340-348. (in Chinese)
- [5] 黎大爵. 甜高粱可持续农业生态系统研究. 中国农业科学, 2002, 35(8): 1021-1024.
Li D J. Studies on sustainable agro-ecology system of sweet sorghum. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(8): 1021-1024. (in Chinese)
- [6] 石元春. 生物质能源前景无限. 新农业, 2007, (1): 4-5.
Shi Y C. The bright prospect in development of biomass energy. *Modern Agriculture*, 2007, (1): 4-5. (in Chinese)
- [7] 董桂春, 王余龙, 张传胜, 张岳芳, 陈培峰, 杨连新, 黄建晔, 龙银成. 氮素籽粒生产效率不同的籼稻品种物质生产和分配的基本特点. 作物学报, 2007, 33(1): 137-142.
Dong G C, Wang Y L, Zhang C S, Zhang Y F, Chen P F, Yang L X, Huang J Y, Long Y C. Characteristics of dry matter accumulation and distribution in conventional *indica* rice cultivars with different nitrogen use efficiency for grain output. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(1): 137-142. (in Chinese)
- [8] 许为钢, 胡琳, 吴兆苏, 盖钧镱. 关中小麦品种同化物积累分配特性与源库构成遗传改良的研究. 作物学报, 1999, 25(5): 548-555.
Xu W G, Hu L, Wu Z S, Gai J Y. Genetic improvement of accumulation and distribution of assimilates and source sink constitution of wheat cultivars in Mid-Shaanxi area. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25 (5): 548-555. (in Chinese)
- [9] Ferraris R, Charles-Edwards D A. A comparative analysis of the growth of sweet and forage sorghum crops. I Dry matter production, phenology and morphology. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1986, 37: 495-512.
- [10] Ferraris R, Charles-Edwards D A. A comparative analysis of the growth of sweet and forage sorghum crops. II Accumulation of soluble carbohydrates and nitrogen. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1986, 37: 513-522.
- [11] Vietor D M, Miller F R. Assimilation, partitioning, and nonstructural carbohydrates in sweet compared with grain sorghum. *Crop Science*, 1990, 30: 1109-1115.
- [12] Dolciotti I, Mambelli S, Grandi S, Venturi G. Comparison of two sorghum genotypes for sugar and fiber production. *Industrial Crops and Products*, 1998, 7: 265-272.
- [13] 范仲学, 王璞, 梁振兴. 谷类作物的氮肥利用效率及其提高途径研究进展. 山东农业科学, 2001, (4): 47-50.
Fan Z X, Wang P, Liang Z X. Advances in research of nitrogen use efficiency of cereal and its increasing ways. *Shandong Agricultural Sciences*, 2001, (4): 47-50. (in Chinese)
- [14] 徐祥玉, 张敏敏, 翟丙年, 李生秀, 张兴昌, 王朝辉. 夏玉米氮效率基因型差异研究. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 495-499.

- Xu X Y, Zhang M M, Zhai B N, Li S X, Zhang X C, Wang Z H. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 495-499. (in Chinese)
- [15] Traore A, Maranville J W. Nitrate reductase activity of diverse grain sorghum genotypes and its relationship to nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 863-869.
- [16] 董桂春, 王余龙, 张岳芳, 陈培峰, 杨连新, 黄建晔. 不同氮素籽粒生产效率类型籼稻品种产量及其构成的基本特点. *作物学报*, 2006, 32(10): 1511-1518.
- Dong G C, Wang Y L, Zhang Y F, Chen P F, Yang L X, Huang J Y. Characteristics of yield and yield components in conventional *indica* rice cultivars with different nitrogen use efficiencies for grain output. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(10): 1511-1518. (in Chinese)
- [17] Amaducci S, Monti A, Venturi G. Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques. *Industrial Crops and Products*, 2004, 20: 111-118.
- [18] Gardner J C, Maranville J W, Pappozzi E T. Nitrogen use efficiency among diverse sorghum cultivars. *Crop Science*, 1994, 34: 728-733.
- [19] 高士杰, 刘晓辉, 李玉发, 李继洪. 中国甜高粱资源与利用. *杂粮作物*, 2006, 26(4): 273-274.
- Gao S J, Liu X H, Li Y F, Li J H. Sweet sorghum resources and its utilization in China. *Rain Fed Crops*, 2006, 26(4): 273-274. (in Chinese)
- [20] 李振武, 支 萍, 孔令旗, 韩福光, 孟广艳. 甜高粱主要性状的遗传参数分析. *作物学报*, 1992, 18(3): 213-221.
- Li Z W, Zhi P, Kong L Q, Han F G, Meng G Y. Analysis of genetic parameters of main traits in sweet sorghum. *Acta Agronomica Sinica*, 1992, 18(3): 213-221. (in Chinese)
- [21] Yemm E W, Willis A J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical Journal*, 1954, 57: 508-514.
- [22] 江立庚, 戴廷波, 韦善清, 甘秀芹, 徐建云, 曹卫星. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 466-471.
- Jiang L G, Dai T B, Wei S Q, Gan X Q, Xun J Y, Cao W X. Genotypic differences and valuation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, 27(4): 466-471. (in Chinese)
- [23] McMaster G S, Wilhelm W W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87: 291-300.
- [24] 李淮滨, 翟婉萱, 于贵瑞, 王守才, 郭洪礼, 吴艳玲. 甜高粱与粒用高粱干物质积累分配与产量形成的比较研究. *作物学报*, 1991, 17(3): 204-212.
- Li H B, Zhai W X, Yu G R, Wang S C, Guo H L, Wu Y L. A comparative study on the accumulation and distribution of dry matter and formation of yield of sweet sorghum and grain sorghum. *Acta Agronomica Sinica*, 1991, 17(3): 204-212. (in Chinese)
- [25] 马鸿图, 周继新, 王守财. 不同高粱基因型生产力的研究. *辽宁农业科学*, 1986, (1): 5-9.
- Ma H T, Zhou J X, Wang S C. Study on the productivity of different genotypes of sorghum. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1986, (1): 5-9. (in Chinese)
- [26] 李继洪, 刘晓辉, 李淑杰, 高士杰. 主成分分析在甜高粱育种中的应用. *杂粮作物*, 2007, 27(1): 17-18.
- Li J H, Liu X H, Li S J, Gao S J. Application of principal component analysis in sweet sorghum breeding. *Rain Fed Crops*, 2007, 27(1): 17-18. (in Chinese)
- [27] 黄高宝, 张恩和, 胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(3): 293-297.
- Huang G B, Zhang E H, Hu H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(3): 293-297. (in Chinese)
- [28] Gouis J L, Beghin D, Heumez E, Pluchard P. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilization efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 2000, 12: 163-173.
- [29] 王进军, 黄瑞冬. 玉米氮效率及其研究进展. *玉米科学*, 2005, 13(1): 89-92.
- Wang J J, Huang R D. Nitrogen use efficiency and its research advances in maize. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(1): 89-92. (in Chinese)
- [30] Singh U, Ladha J K, Castillo E G, Punzalan G, Tirol-Padre A, Duqueza M. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium and long-duration rice. *Field Crops Research*, 1998, 58: 35-53.
- [31] Barbanti L, Grandi S, Vecchi A, Venturi G. Sweet and fiber sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), energy crops in the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 30-39.
- [32] 靳万贵, 马富裕, 窦永福, 伍伟斌, 刘升学. 盐碱荒地滴灌施氮对甜菜干物质积累、氮代谢的影响. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2000, 4(4): 259-264.
- Jin W G, Ma F Y, Dou Y F, Wu W B, Liu S X. Effect on sugar beet dried substance accumulation, metabolism of nitrogen in the salt-alkali wild-lands by applying drip-irrigation of nitrogen fertilizers. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition)*, 2000, 4(4): 259-264. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)