

24 个甜高粱品种主要农艺性状与品质性状遗传多样性分析

王继师¹ 刘祖昕¹ 樊帆¹ 韩立朴² 谢光辉^{1*}

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院/国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100193;

2. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心,石家庄 050021)

摘要 本研究对国内 9 份和国外 15 份甜高粱自交系品种的 45 个农艺性状和品质性状在新疆干旱区的表现进行遗传参数分析。目的是了解甜高粱种质资源在新疆干旱区的表现,为新疆干旱区甜高粱品种选育提供参考依据。遗传多样性分析表明,主要农艺、产量及品质性状的遗传多样性指数平均为 1.831 9,明显高于分级性状的 0.779 6。其中,茎秆产量的遗传多样性指数达到 1.817 2,茎秆可溶性总糖含量遗传多样性指数为 1.946 9。变异系数分析表明,各性状的遗传变异潜力较大。其中,叶鞘可溶性总糖含量变异系数最大为 50.3%,播种-出苗期变异系数最小为 5.7%,总体平均为 23.9%。遗传参数分析表明,农艺性状平均广义遗传率为 0.74;产量性状平均广义遗传率为 0.92;各品质性状平均广义遗传率为 0.93,其中茎秆可溶性总糖的广义遗传率达到 0.99。进一步分析发现茎秆产量和茎秆可溶性总糖含量的相对遗传进度分别为 81.1%和 84.9%,可获得遗传增量分别是 122.3 和 212.3 g/kg,说明该甜高粱群体的茎秆产量和茎秆可溶性总糖含量均有着巨大的改良潜力。

关键词 甜高粱; 生物量; 碳水化合物; 遗传多样性指数; 广义遗传率; 遗传进度

中图分类号 S 566.5

文章编号 1007-4333(2012)06-0083-09

文献标志码 A

Analysis of genetic diversity and inheritability of agronomic traits and chemical compositions in sweet sorghum (*Sorghum bicolor*)

WANG Ji-shi¹, LIU Zu-xin¹, FAN Fan¹, HAN Li-pu², XIE Guang-hui^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology/National Energy R&D Center for Non-food Biomass,
China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Center for Agricultural Resources research, Institute of Genetics and Developmental Biology,
Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract Twenty-four sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties were selected in the study to analyze genetic diversity and inheritability of 45 agronomic traits and chemical compositions. The objective is to examine the performance of sweet sorghum germplasm in the arid area and then to assist its breeding in Xinjiang province. The results showed: the mean value of coefficient of genetic diversity (H') in quantity characters (1.831 9) was much higher than that in classified characters (0.779 6). H' for yield and soluble sugar content in stem were 1.817 2 and 1.946 9, respectively. Great genetic variation was observed. The mean value of coefficient of genetic variance (CV) was 23.9%, with the largest one (50.3%) in leaf sheath soluble sugar content and the least one (5.7%) in sowing-emergency duration. Further analysis found that the mean value of broad sense heritability (h_B^2) in agronomic, yield and chemical composition traits were 0.74, 0.92, 0.93, respectively, including h_B^2 for stem soluble sugar content (0.99). Relative genetic advance (ΔG) analysis revealed that ΔG of stem yield and stem soluble sugar content were 81.1% and 84.9%, and its genetic gain (G) were 122.3 and 212.3, respectively. Results revealed that stem yield and stem soluble sugar content of sweet sorghum had great potential for further genetic improvement.

Key words sweet sorghum; biomass; carbohydrates; genetic diversity index; broad sense heritability; genetic gain

收稿日期: 2012-06-30

基金项目: 国家能源局能源节约和科技装备司项目(科技司函[2012]32号)

第一作者: 王继师, 硕士研究生, E-mail: wjishi@163.com

通讯作者: 谢光辉, 教授, 主要从事非粮生物质原料研究, E-mail: xiegh@cau.edu.cn

随着能源危机和环境危机日益严峻,生物质能成为最有潜力的可再生清洁能源^[1-2]。甜高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench)因其生物产量高、含糖量高、耗水量少和抗逆性强等特点被认为是我国最具潜力的能源作物之一^[3-4]。甜高粱种质资源是其遗传改良的重要基因来源,是培育适应能源生产的优质新品种的重要物质基础。当前,我国共有甜高粱种质资源 1 536 份,其中国内种质资源 374 份,从国外引入的种质资源 1 152 份^[5-7]。对种质资源进行系统的鉴定,全面了解其遗传特点,以充分地利用这些种质资源,是甜高粱育种工作的基础。当前,对甜高粱遗传潜力研究仍主要停留在农艺性状上^[8-11]。本试验以来源于中国和美国的共 24 份甜高粱种质资源为材料,对其主要农艺性状、产量性状和品质性状进行遗传研究,分析其遗传多样性、遗传变异系数、遗传力及遗传进度等遗传参数,以期为新

疆干旱区甜高粱种质资源的合理利用和遗传育种工作提供参考依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地点

试验于 2009 年在新疆农业大学三坪实验站进行(43°01'N, 88°37'E)。试验地所在地区属于温带大陆性干旱气候,年均太阳辐射 3 000 h,平均气温 6.4 °C,年均降水量 194 mm,降水量最大月为 7 和 8 月。试验区土壤为壤土,pH 8.6,0~20 cm 土层内养分含量分别为:有机质 15 mg/kg,全氮 0.8 g/kg,速效磷 9.7 mg/kg,速效钾 248.7 mg/kg。

1.2 供试材料及试验设计

本试验以 24 份甜高粱种质资源为参试材料(表 1),采用完全随机区组设计,6 次重复,小区面积 3×5=15 m²。2009 年 5 月 5 日以覆膜穴播方式播种,

表 1 供试的 24 份甜高粱种质资源

Table 1 Origin of the 24 sweet sorghum accessions used in this study

系统号	材料名称	来源	提供单位
X002	Awanlek	美国	CAAS-NCGC
X003	Babush	美国	CAAS-NCGC
X005	Collier-7	美国	CAAS-NCGC
X006	Depar	美国	CAAS-NCGC
X008	Ex India	美国	CAAS-NCGC
X009	Feterita Fayoumi 3	美国	CAAS-NCGC
X010	Imsak Marsaatak	美国	CAAS-NCGC
X014	Katemu	美国	CAAS-NCGC
X015	Lambas	美国	CAAS-NCGC
X018	Mn-1126	美国	CAAS-NCGC
X024	Italia	美国	CAAS-ICS
X026	绿能 3 号	中国	北京绿能经济植物研究所
X028	新高粱 2 号	中国	新疆农科院经济作物研究所
X033	绿能 2 号	中国	北京绿能经济植物研究所
X034	甜饲 1 号	中国	北京绿能经济植物研究所
X053	Cowley	美国	CAAS-ICS
X054	Roma	美国	CAAS-ICS
X055	Rio	美国	CAAS-ICS
X057	Wray	美国	CAU-NECB
X058	0540	中国	山西农科院高粱所
X059	05206	中国	山西农科院高粱所
X095	能饲 1 号	中国	CAU-NECB
X097	X097	中国	CAU-NECB
X125	浩短	中国	CAU-NECB

注:CAAS-NCGC 指中国农科院国家作物种子库;CAAS-ICS 指中国农科院作物所;

CAU-NECB 指中国农业大学国家能源非粮生物质原料研发中心。

密度为 71 400 穴/hm²，行距 0.7 m，株距 0.2 m。播种前施用 90 kg/hm² N(尿素)，60 kg/hm² P₂O₅ (磷酸二氢铵)。拔节期追施 60 kg/hm² N(尿素)。3~4 叶期定苗，每穴 1 株，拔节前除去多余分蘖。于 4 月 26 日、7 月 28 日和 8 月 25 日以漫灌方式对各试区浇水。在籽粒灌浆期套网袋防鸟食。各材料籽粒进入蜡熟期时取样收获，初霜前(9 月 22 日)对未结实材料统一收获。

1.3 试验方法

性状调查：调查每个小区的出苗期、拔节期、抽穗期、成熟期、全生育期、分蘖数、抗病力、抗虫力、株高、茎粗、伸长节间数。参照陆平《高粱种质源描述规范和数据标准》^[12]。

产量测定：收获时每小区随机选取 10 株收获整株，测定株高、茎粗后，将根、茎、叶片、叶鞘和果穗分离，分别测定根鲜重、茎鲜重、叶片鲜重、叶鞘鲜重和穗鲜重。以四分法分别取根、茎、叶片、叶鞘样带回实验室，105℃杀青 30 min，70℃烘干至恒重，测定含水量，计算干物重。果穗放入网袋，风干后考种并调查籽粒均匀度、粒型、饱满度、粒色、颖壳包被度、颖壳色和千粒重，并全部脱粒称重，穗轴和枝梗 70

℃烘干至恒重后计入茎秆重。计算全株生物量时，以干重计，对籽粒按含水率为 14% 扣除水分。样品烘干后粉碎，过 0.5 mm 筛，用于可溶性总糖、淀粉、纤维素、半纤维素和木质素的分析测定，测定前置于冰柜内保存。

品质指标测定：可溶性总糖含量和淀粉含量采用蒽酮比色法测定^[13]；纤维素、半纤维素和木质素的含量采用范氏洗涤法测定^[14]，用 Ankom 纤维素测定仪提取和洗涤木质纤维素。

1.4 数据处理

分级性状，主要分析性状类别的频率分布和多样性指数，具体分级标准见表 2。农艺性状、产量性状和品质性状，主要计算最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数、多样性指数、广义遗传率及遗传进度。按变异系数值划分变异程度，0~10% 为较低，10~20% 为中等，20% 以上为较高。农艺、产量及品质性状利用平均数和标准差将材料划分为 10 级，从第 1 级 $X_1 < (\bar{X} - 2S)$ 到第 10 级 $X_{10} \geq (\bar{X} + 2S)$ ，每 0.5S 为 1 级，每组的相对频率用于计算多样性指数。按照方差分析原理和方法进行方差分析，数据分析部分采用 SAS9.1 和 EXCEL 软件完成。

表 2 甜高粱 9 个分级性状及其调查标准

Table 2 Nine classified characters of sweet sorghum and their evaluation criteria

性状	调查标准
分蘖数	1(≤2), 2(≥3)
抗病力	发病(丝黑穗病、茎腐病、大斑病)植株占全部植株的比例, 1(0%), 2(≤25%), 3(≤50%), 4(>50%)
抗虫力	受虫害(蚜虫、红蜘蛛)植株占全部植株的比例, 1(0%), 2(≤25%), 3(≤50%), 4(>50%)
籽粒均匀度	1(均匀), 2(一般), 3(较差)
粒型	1(圆), 2(椭圆), 3(卵形), 4(长圆)
籽粒饱满度	1(饱满), 2(凹陷)
粒色	1(白), 2(灰白), 3(浅黄), 4(黄), 5(橙), 6(红), 7(褐), 8(黑)
颖壳包被度	1(裸露), 2(1/4 包被), 3(2/4 包被), 4(3/4 包被), 5(全包被)
颖壳色	1(白色), 2(黄色), 3(灰色), 4(红色), 5(褐色), 6(紫色), 7(黑色)

主要计算公式为：

变异系数

$$CV = \frac{S^{[15]}}{\bar{X}} \quad (1)$$

Shannon-Weaver 遗传多样性指数

$$H' = - \sum P_i \times \ln P_i^{[15]} \quad (2)$$

广义遗传率

$$h_B^2 = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_p^2}^{[15-16]} \quad (3)$$

遗传进度

$$G = k \times h_B^2 \times \sigma_p^{[15-16]} \quad (4)$$

相对遗传进度

$$\Delta G = 100 \times \frac{G}{\bar{X}}^{[15-16]} \quad (5)$$

式中: S 为标准偏差; \bar{X} 为性状平均值; P_i 为第*i*级别的相对频率; σ_g^2 是基因型方差; σ_p^2 为表型方差; k 代表选择强度,5%选择强度下约为2.06。

2 结果与分析

2.1 遗传多样性分析

2.1.1 分级性状遗传多样性

9个分级性状间的多样性指数差异较大(表3)。

表3 24份甜高粱材料9个分级性状的频率分布和多样性指数

Table 3 Frequency distribution and diversity index(H') of 9 classified traits in the 24 sweet sorghum varieties

性状	频率分布/%								多样性指数 H'
	1	2	3	4	5	6	7	8	
分蘖数	0.96	0.04							0.173 2
抗病力	0.00	0.53	0.37	0.10					0.929 2
抗虫力	0.00	0.38	0.42	0.20					1.055 1
籽粒均匀度	0.76	0.24	0.00						0.548 9
粒型	0.62	0.29	0.10	0.00					0.878 8
籽粒饱满度	1.00	0.00							0.000 0
粒色	0.29	0.14	0.43	0.05	0.05	0.00	0.05	0.00	1.434 0
颖壳包被度	0.00	0.19	0.76	0.05	0.00				0.668 0
颖壳色	0.14	0.24	0.00	0.38	0.00	0.24	0.00		1.329 0

2.1.2 农艺、产量及品质性状遗传多样性

各农艺性状间存在着广泛的遗传多样性(表4)。其中,播种-出苗期多样性指数最小,为1.299 1,其余8个农艺性状的多样性指数在1.990 5~1.736 4之间。其中,伸长节间数多样性指数最高(1.990 5),其次是拔节-抽穗期(1.971 6)和茎粗(1.954 5)。全生育期和各个生育时期的多样性指数均较大,各个材料间差异明显,易从中选育出适合特定气候区的甜高粱品种。结果表明参试甜高粱种质在各个农艺性状上差异较大,有着丰富的遗传多样性。

产量性状的多样性指数变幅在1.921 4~1.710 5之间(表4)。其中,籽粒产量的多样性指数最大,达到1.921 4,其次为全株生物量(1.908 0)、根干重(1.849 1)、茎秆重(1.817 2),叶片干重的多样性指

其中,粒色频率分布的离散性最高,多样性指数最大(1.434 0),其次是颖壳色(1.329 0),籽粒饱满度的离散程度最低,多样性指数最小,为0。由表3可知,24份供试甜高粱材料在新疆干旱气候区分蘖少,有着较强的抗病和抗虫力。结实饱满、均匀,以圆形、浅黄色籽粒为主。其中,61.9%的材料为圆形籽粒,42.9%的材料籽粒颜色为浅黄色,颖壳色以黄色、红色和紫色居多,颖壳半包被材料有16个,占全部材料76.2%。

数最低,只有1.710 5。参试甜高粱的全株生物量和茎秆干重的多样性指数较高,说明参试的种质具有丰富的变异,改良潜力较大。

可溶性总糖、淀粉、纤维素、半纤维素和木质素5种组分的含量在籽粒、茎秆、叶片、叶鞘中遗传多样性表达差异明显(表4)。籽粒中淀粉含量的多样性指数最高(1.928 6),茎秆中可溶性总糖的多样性指数最高(1.946 9),叶片、叶鞘中多样性指数最高的分别是纤维素(1.998 9)和木质素(1.944 0)。5种组分中,可溶性总糖的平均多样性指数最大,为1.888 1,而木质素的平均多样性指数最小,为1.730 0。结果表明,茎秆中可溶性总糖含量和木质素含量均有着丰富的多样性,说明有较大的改良空间提高茎秆可溶性总糖含量并努力降低茎秆中木质素含量。

表4 24个甜高粱9个农艺性状、7个产量性状以及20个品质性状的主要参数

Table 4 Main parameters of 9 agronomic, 7 yielding and 20 chemical composition traits in 24 sweet sorghum varieties

性状	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	多样性指数 H'
农艺性状						
播种-出苗期/d	7.0	9.0	8.1	0.5	5.7	1.299 1
出苗-拔节期/d	32.0	46.5	38.6	3.8	9.9	1.918 6
拔节-抽穗期/d	24.0	60.0	44.0	9.1	20.7	1.971 6
抽穗-成熟期/d	28.0	41.0	34.4	3.3	9.7	1.895 5
全生育期/d	100.5	131.5	115.9	9.4	8.1	1.824 4
株高/cm	206.2	295.4	253.7	31.4	12.4	1.736 4
茎粗/cm	1.9	2.4	2.1	0.1	7.0	1.954 5
千粒重/g	14.0	53.6	25.8	8.7	33.9	1.791 3
伸长节间数	8.8	15.6	12.5	1.8	14.0	1.990 5
产量性状						
籽粒产量/(g/株)	2.1	148.9	76.6	37.9	49.5	1.921 4
茎秆干重/(g/株)	44.8	305.0	150.8	62.1	41.1	1.817 2
叶片干重/(g/株)	29.2	97.6	50.7	13.6	26.7	1.710 5
叶鞘干重/(g/株)	12.9	37.1	23.0	4.7	20.6	1.751 8
地上部生物量/(g/株)	225.1	435.1	303.7	52.8	17.4	1.737 6
根干重/(g/株)	23.2	72.3	44.6	10.0	22.4	1.849 1
全株生物量/(g/株)	264.1	490.9	348.3	56.6	16.2	1.908 0
籽粒化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	19.3	72.6	50.6	12.7	25.1	1.884 4
淀粉/(g/kg)	128.6	641.1	400.5	121.8	30.4	1.928 6
纤维素/(g/kg)	25.3	67.3	44.6	12.7	28.5	1.856 0
半纤维素/(g/kg)	77.2	358.5	142.7	59.5	41.7	1.711 7
木质素/(g/kg)	3.4	20.8	9.0	4.0	44.3	1.614 5
茎秆化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	73.2	451.6	250.2	103.8	41.5	1.946 9
淀粉/(g/kg)	6.1	22.1	10.6	3.9	37.3	1.559 6
纤维素/(g/kg)	157.0	346.0	226.3	60.4	26.7	1.827 3
半纤维素/(g/kg)	148.6	309.3	215.5	47.6	22.1	1.892 0
木质素/(g/kg)	10.7	46.5	21.4	7.8	36.5	1.830 1
叶片化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	31.1	121.5	67.3	21.0	31.1	1.895 5
淀粉/(g/kg)	6.5	15.5	10.2	1.9	18.8	1.964 6
纤维素/(g/kg)	207.9	284.3	255.0	18.4	7.2	1.998 9
半纤维素/(g/kg)	186.5	265.7	226.9	20.7	9.1	1.885 0
木质素/(g/kg)	8.8	26.5	13.8	3.2	23.3	1.531 3
叶鞘化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	21.6	128.5	57.3	28.8	50.3	1.825 6
淀粉/(g/kg)	5.6	17.4	8.5	2.9	33.9	1.672 2
纤维素/(g/kg)	246.2	356.6	318.6	25.3	7.9	1.723 5
半纤维素/(g/kg)	246.1	304.5	277.1	16.7	6.0	1.794 2
木质素/(g/kg)	17.8	42.2	28.1	6.1	21.6	1.944 0

2.2 变异系数分析

遗传变异系数是遗传变异潜力大小的标志,表示群体中直接选择的范围。变异系数大的性状说明从该群体中选出具有该性状的优良个体的几率大,反之则小,因此在选择时,可参考性状的变异情况进行选择。由表4可知,拔节-抽穗期和千粒重的遗传变异程度较高。其中,供试材料平均千粒重为25.8 g,变幅14.0~53.6 g,变异系数最大,为33.9%;株高和伸长节间数遗传变异程度中等,分别为12.4%和14.0%;茎粗等5个农艺性状遗传变异程度较低,在5.7~9.9%之间;播种-出苗期平均为8.1 d,变幅7.0~9.0,变异程度最低。

供试甜高粱材料的产量性状变异程度差异较大,各器官的变异程度较高,变异系数均在20%以上(表4)。籽粒遗传变异程度最高,变异系数49.5%,变幅2.1~148.9 g/株,平均产量为76.6 g/株,其中,X033,X034和X057三个材料生育期较长,未能完成生理成熟,于9月22日(初霜期)统一收获,平均单株籽粒产量分别只有5.6、25.2和2.8 g。其次是茎秆,变异系数为41.1%,变幅在35.0~44.8 g/株之间,平均产量150.8 g/株。叶片、叶鞘和根产量的变异系数在20.6%~26.7%之间。全株生物量的变异系数最小,只有16.2%,变幅264.1~490.9 g/株,平均全株生物量为348.3 g/株。结果表明全株生物量表现最为稳定,不易受环境因素影响,选择标准应适当从严。

除了叶片、叶鞘的结构性碳水化合物变异系数在6.0%~9.1%之间,变异程度较低外,其余16个品质性状变异程度均较高(表4)。籽粒中,木质素含量在5种不同的化学组分中变异系数最大,为44.3%,在茎秆、叶片和叶鞘中,变异系数最大的组分均为可溶性总糖含量,依次为41.5%、31.1%和50.3%。此外,可溶性总糖的平均变异系数达37.0%,也明显高于另外4种组分。纤维素的平均变异系数最低,只有17.6%。在20个品质性状中,叶鞘可溶性总糖的遗传变异程度最高,其平均值为57.3 g/株,变幅21.6~128.5 g/株,而叶鞘半纤维素的变异系数只有6.0%,平均值为277.1 g/株,变幅246.1~304.5 g/株,遗传变异程度最低。其中,X033,X034和X057三个高粱材料未能及时成熟,只调查了籽粒产量,没有对籽粒品质做进一步分析,对籽粒品质性状做特征值分析和遗传参数分析时也均不过包含上述三个高粱材料。

遗传变异系数是群体遗传变异潜力的一个度量值。据以上分析结果,试验群体在主要的碳水化合物含量性状上,表现出较高的遗传变异潜力,茎秆的可溶性总糖和木质素的遗传变异潜力更大,这给甜高粱综合性状改良特别是茎秆糖分和茎秆加工品质的改进提供了较大的可能。

2.3 遗传参数分析

2.3.1 广义遗传率

遗传力的高低反映了该性状表型由遗传因素和环境因素决定的程度,根据性状遗传力的大小,制定适当的选择方案,可以提高选择效果,提高育种效率。本试验应用方差分析法估算24份甜高粱种质资源主要农艺性状、产量性状和品质性状的广义遗传率(表5)。从表5看出:农艺性状的广义遗传率差异较大。其中,千粒重的遗传力最大(1.00),其次是全生育期、出苗-拔节期、伸长节间数,遗传力都在0.90以上,说明这些性状比较稳定,受环境因素影响小,易从表现型识别基因型,世代选择可靠性大。茎粗的遗传力最低,广义遗传率为0.23,表明这一性状易受环境因素影响,早期世代不宜进行选择。播种-出苗期的误差项大于处理方差,无法估算出基因型方差和表型方差,不能计算得到广义遗传率和遗传进度。

产量性状的遗传力表现稳定,广义遗传率均在0.87以上(表5)。其中,叶片干重的广义遗传率最高为0.98,其次是茎秆产量和籽粒产量,广义遗传率分别为0.96和0.95,根干重和全株生物量的遗传力最低,但广义遗传率也都达到了0.87水平。结果表明产量性状受环境条件的影响较小,表型值主要由遗传因素决定,品种选育时可以从早代进行选择,入选群体可适当小些。

16个碳水化合物性状和4个木质素性状的广义遗传率列于表5。5种组分在籽粒和茎秆中均表现出较高的遗传力水平,广义遗传率在0.94~0.99之间,其中可溶性总糖的遗传力最大,平均可达0.97,半纤维素的遗传力最低,平均达到0.90。在籽粒中,淀粉表现的遗传力最高(0.99),而在茎秆、叶片和叶鞘中可溶性总糖的遗传力最高,广义遗传率分别达到0.99、0.94和0.99。结果表明甜高粱各器官的碳水化合物含量和木质素含量的遗传力较大,与农艺性状和产量性状相比更为稳定,根据品质性状的遗传力估值制定选择方案,更能提高选择效果,增强选择的预见性。

表5 24个甜高粱9个农艺性状、7个产量性状以及20个品质性状的广义遗传力和遗传进度

Table 5 Broad sense heritability and genetic advance of 9 agronomic, 7 yielding and 20 chemical composition traits in the 24 sweet sorghum varieties

性状	方差组分			广义遗传率	遗传进度	相对遗传进度/%
	环境	基因型	表型			
农艺性状						
播种-出苗期 ^a /d	—	—	—	—	—	—
出苗-拔节期/d	2.59	13.24	14.53	0.91	7.2	18.5
拔节-抽穗期/d	33.75	66.02	82.89	0.80	14.9	34.0
抽穗-成熟期/d	7.38	7.34	11.03	0.67	4.6	13.3
全生育期/d	3.61	86.01	87.81	0.98	18.9	16.3
株高/cm	3 310.06	434.50	986.18	0.44	28.5	11.2
茎粗/cm	0.10	0.01	0.02	0.23	0.1	3.3
千粒重/g	0.35	87.22	87.34	1.00	19.2	74.5
伸长节间数	1.67	2.79	3.07	0.91	3.3	26.3
产量性状						
籽粒产量/(g/株)	446.73	1 361.57	1436.03	0.95	74.0	96.6
茎秆干重/(g/株)	1 002.85	3 683.72	3850.86	0.96	122.3	81.1
叶片干重/(g/株)	21.63	180.55	184.16	0.98	27.4	54.0
叶鞘干重/(g/株)	9.39	20.90	22.46	0.93	9.1	39.5
地上部生物量/(g/株)	1 910.56	2 465.49	2783.92	0.89	96.3	31.7
根干重/(g/株)	74.89	87.29	99.77	0.87	18.0	40.3
全株生物量/(g/株)	2 402.05	2 800.88	3201.23	0.87	102.0	29.3
籽粒化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	35.43	174.09	185.90	0.94	26.3	52.0
淀粉/(g/kg)	635.19	16 855.43	17 067.16	0.99	265.8	66.4
纤维素/(g/kg)	11.78	182.23	186.15	0.98	27.5	61.7
半纤维素/(g/kg)	471.10	3 908.61	4 065.65	0.96	126.3	88.5
木质素/(g/kg)	1.09	17.74	18.11	0.98	8.6	95.9
茎秆化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	224.57	10 700.15	10 775.01	0.99	212.3	84.9
淀粉/(g/kg)	1.95	14.90	15.55	0.96	7.8	73.6
纤维素/(g/kg)	429.97	3 505.31	3 648.63	0.96	119.5	52.8
半纤维素/(g/kg)	388.06	2 137.12	2 266.48	0.94	92.5	42.9
木质素/(g/kg)	7.11	58.90	61.27	0.96	15.5	72.3
叶片化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	76.61	414.07	439.61	0.94	40.7	60.4
淀粉/(g/kg)	1.46	3.23	3.72	0.87	3.5	33.7
纤维素/(g/kg)	157.35	284.31	336.76	0.84	31.9	12.5
半纤维素/(g/kg)	187.98	365.39	428.05	0.85	36.4	16.0
木质素/(g/kg)	4.90	8.66	10.29	0.84	5.6	40.4
叶鞘化学成分						
总可溶性糖/(g/kg)	17.03	825.80	831.48	0.99	59.0	103.0
淀粉/(g/kg)	1.85	7.66	8.27	0.93	5.5	64.5
纤维素/(g/kg)	193.66	576.47	641.03	0.90	46.9	14.7
半纤维素/(g/kg)	117.20	241.33	280.39	0.86	29.7	10.7
木质素/(g/kg)	8.72	34.17	37.08	0.92	11.6	41.1

注: a 性状的误差大于处理内部方差。

2.3.2 遗传进度

遗传进度在育种上可为性状的选择效果提供理论估计,24份甜高粱材料各主要农艺性状、产量性状和品质性状在5%选择强度下遗传进度的绝对值和相对值列于表5。在主要的农艺性状中,千粒重的相对遗传进度最高,达到74.5%,遗传进度为19.2 g,其次是拔节-抽穗期,相对遗传进度34.0%,遗传进度14.9 d。其余性状的相对遗传进度都在30.0%以下,其中,茎粗性状最为稳定,遗传进度为0.1 cm,相对遗传进度在所有农艺性状中最低,只有3.3%,表明茎粗等农艺性状直接选择效果较差,获得的遗传增量有限。

比较发现,产量性状的相对遗传进度明显高于农艺性状的相对遗传进度(表5)。其中,籽粒、茎秆、叶片的相对遗传进度均在50.0%以上,分别达到96.6%、81.1%和54.0%,直接选择的遗传进度分别可达74.0、122.3和27.4 g,全株生物量的相对遗传进度最低为29.3%,遗传进度为102.0 g,结果表明,对该甜高粱自交系群体进行适当的组配,其子代可获得显著的产量增量。

20个品质性状的遗传进度列于表5。可以看出:5种组分在籽粒中均表现出较高的遗传进度水平,其中,木质素的相对遗传进度最大(95.9%),遗传进度达8.6 g/kg,而在茎秆、叶片、叶鞘中,均是可溶性总糖的相对遗传进度最高,分别是84.9%、60.4%和103.0%,遗传进度分别为212.3、40.7和59.0 g/kg。此外,5种化学成分的平均相对遗传进度依然是可溶性总糖最高(75.1%),其次是木质素的62.4%,纤维素最为稳定,平均相对遗传进度只有35.4%。

3 讨论

开发利用甜高粱种质资源及其遗传多样性是品种改良的基础,加强种质资源的研究,以不断满足甜高粱育种对种质资源遗传多样性的需求,为使用者提供重要信息。本研究对甜高粱种质资源在新疆主要性状的变异系数分析和遗传多样性分析可知,24份甜高粱种质资源间存在较大差异,无论是农艺性状、产量性状还是品质性状,其变异幅度都很大,多样性丰富,具备良好的改良潜力。

本研究结果表明甜高粱种质资源的分级性状中,粒色的遗传多样性指数最大,为1.434 0。赵香娜^[9]、冯国群^[11]分别对206份和72份甜高粱种质

资源的遗传多样性进行研究,也是粒色的遗传多样性指数最高,其研究结果分别为2.041 2和1.633 3。两人研究的粒色遗传多样性均明显高于本试验的研究结果,其原因可能是其研究的种质资源群体较大,来源更广泛。此外,本试验研究还发现,在农艺性状中,生育期等数量性状平均遗传多样性指数为1.885 4,明显高于粒色等分级性状的0.779 6,这与赵香娜的研究结果相同^[9]。

研究发现现有群体全生育期的变异系数为8.1%,结果表明生育期的遗传变异潜力有限^[10,17],为此应进一步引进远缘基因,丰富甜高粱种质资源群体,以培育出适合新疆地区种植的甜高粱早熟品种。遗传变异程度分析表明,不仅甜高粱茎秆产量有着较高的变异程度^[17],茎秆中可溶性总糖和木质素的变异程度也很高,其变异系数分别为41.5%和36.5%,这为筛选出高产、高糖协同提高的甜高粱易发酵新品种提供了可能。

各个性状的遗传参数分析发现,农艺性状的广义遗传率平均为0.74,明显低于产量性状的0.92和品质性状的0.93,这与高明超^[18]、曹文伯^[19]的研究结果相似,结论证实农艺性状更易受环境因素影响,农艺性状的表现型不能准确反应出真实的基因型效应,为此,在开展甜高粱育种工作时,除了调查主要的农艺性状,还应适当结合产量性状和品质性状的评估,以制定更加合理的选择方案,提高选择效果。

遗传力不能完全作为选择效果的指标,通过遗传进度的估测,可以进一步明确选择的预期效果^[20]。研究发现供试材料茎秆产量和茎秆可溶性总糖含量均有着丰富的遗传增量,其中茎秆产量的遗传进度可达122.3 g,茎秆可溶性总糖的遗传进度为212.3 g/kg。此外,选择不会在短期内引起群体方差和遗传进度很大变化^[21-22]。因此,应充分利用该甜高粱群体,进一步加强群体遗传改良,以培育出大生物、高含糖量的甜高粱新品种。

参 考 文 献

- [1] Antonopoulou G, Gavala H N, Skiadas I V, et al. Biofuels generation from sweet sorghum: fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass [J]. *Bioresource Technol*, 2008, 99(1): 110-119
- [2] Demirbas A. Progress and recent trends in biofuels [J]. *Prog Energy Combust Sci*, 2007, 33(1): 1-18

- [3] Tian Y S, Zhao L X, Meng H B, et al. Estimation of unused land potential for biofuels development in (the) People's Republic of China[J]. *Appl Energy*, 2009, 86(S1): 77-85
- [4] Zhao Y L, Dolat A, Steinberger Y, et al. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel[J]. *Field Crop Res*, 2009, 111: 55-64
- [5] 曹文伯. 我国甜高粱种质资源鉴定及利用概况[J]. *植物遗传资源学报*, 2001, 2(1): 58-62
- [6] 曹文伯, 李翠珍, 吕凤金, 等. 全国高粱品种资源目录(1991—1995)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [7] 李翠珍, 黎裕. 全国高粱品种资源目录(1996—2000)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [8] Haussmann B I G, Hess D E, Reddy B V S, et al. Quantitative-genetic parameters of sorghum growth under striga infestation in Mali and Kenya[J]. *Plant breed*, 2001, 120: 49-56
- [9] 赵香娜, 李桂英, 刘洋, 等. 国内外甜高粱种质资源主要性状遗传多样性及相关性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2008, 9(3): 302-307
- [10] 刘洋, 罗萍, 林希昊, 等. 甜高粱主要农艺性状相关性及其遗传多样性初析[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(6): 1004-1008
- [11] 冯国郡, 李宏琪, 叶凯, 等. 甜高粱种质资源在新疆的多样性表现及聚类分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2012, 13(3): 398-405
- [12] 陆平. 高粱种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [13] Hewitt B R. Spectrophotometric determination of total carbohydrate[J]. *Nature*, 1958, 182: 246-247
- [14] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. *J Dairy Sci*, 1991, 74: 3583-3597
- [15] 孔繁玲. 植物数量遗传学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006
- [16] Fehr W R. Principles of Cultivar Development, Theory and Technique[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1987
- [17] 李振武, 支萍, 孔令旗, 等. 甜高粱主要性状的遗传参数分析[J]. *作物学报*, 1992, 18(3): 213-221
- [18] 高明超, 王鹏文. 甜高粱主要农艺性状遗传参数估计[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(5): 114-124
- [19] 曹文伯, 庞铁军. 甜高粱品种主要性状广义遗传力的初步研究[J]. *中国种业*, 2009, 8: 45-46
- [20] 闫锋. 甜高粱主要农艺性状遗传参数分析[J]. *中国糖料*, 2010(1): 24-26
- [21] Dudley J W, Lambert J R. Ninety generations of selection for oil and protein content in maize[J]. *Maydica*, 1992, 37: 1-7
- [22] Falconer D S, Markay T F C. Introduction to quantitative genetics[M]. 4th ed. London: Longman, 1996

责任编辑: 袁文业