

高粱杂交种茎叶产量与能源品质性状相关性分析

许依^{1,2} 何思洋^{1,2} 周方圆^{1,2} 唐朝臣^{1,2,3} 谢光辉^{1,2*}

(1. 中国农业大学 农学院,北京 100193;

2. 国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100193;

3. 广东省农业科学院 作物研究所/广东省农作物遗传改良重点实验室,广州 510640)

摘要 为分析能源高粱杂交种茎叶产量与品质性状之间相关关系,以96份能源高粱杂交种为材料,采用完全随机区组设计,在华北平原自然环境差异较大的2个试点地区栽培,测定茎和叶产量及7个茎叶中与能源相关成分含量。结果表明,能源高粱杂交种能源相关性性状变异系数在山西省介休市和河北省涿州市分别为3.7%~61.3%和4.8%~60.0%。其中,茎叶产量和理论乙醇产量的变异系数最大,主要归因于2个试点较大的环境差异。茎产量和叶产量极显著正相关,茎和叶的理论乙醇产量极显著正相关,茎叶之间绝大多数品质性状均呈正相关,说明可协同提高茎叶产量和品质以实现较大的理论乙醇产量。所有研究的性状在介休市和涿州市均可归类为4个主成分。在2个试点,排在前面的主成分均为秸秆产量和茎碳水化合物因子。因此,能源高粱育种应重点关注秸秆产量和茎碳水化合物因子。

关键词 茎产量; 叶产量; 理论乙醇产量; 能源性状; 相关性分析

中图分类号 S566.5

文章编号 1007-4333(2021)05-0001-09

文献标志码 A

Correlations between yield and energy-related quality traits of sorghum hybrids stems and leaves

XU Yi^{1,2}, HE Siyang^{1,2}, ZHOU Fangyuan^{1,2}, TANG Chaochen^{1,2,3}, XIE Guanghui^{1,2*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. National Energy R&D Center for Non-food Biomass, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Crops Research Institute/Guangdong Provincial Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Guangdong Academy of Agricultural Science, Guangzhou 510640, China)

Abstract In order to analyze the correlations between yield and energy-related quality traits of stems and leaves, 96 energy sorghum hybrids were taken as study object. Field experiments in complete random block design were conducted in two sites with distinct differences in environmental condition in North China. The coefficients of variation in the measured traits of the 96 hybrids ranged between 3.7% - 61.3% and 4.8% - 60.0% in Jiexiu and Zhuozhou, respectively. The coefficient of variation of stem and leaf yield and theoretical ethanol yield were the largest among the studied traits. The stem yield and leaf yield were positively correlated. Concerning the same energy-related quality traits, the majority of those traits were positively correlated, and the theoretical ethanol yield of stem and leaf were positively correlated. It indicates that yield and quality traits stem and leaf can be simultaneously improved to achieve high theoretical ethanol yield. The measured traits can be compressed into four principal components in both sites. The first two principal components are straw yield factor and stem carbohydrate factor in Jiexiu and Zhuozhou site. Overall, the straw yield factor and stem carbohydrate factor are the favorable traits that should be paid more attention to.

Keywords stem yield; leaf yield; theoretical ethanol yield; energy-related traits; correlation analysis

收稿日期: 2020-06-09

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);河南省天冠企业集团有限公司资助

第一作者: 许依, 硕士研究生, E-mail: 18473554668@163.com

通讯作者: 谢光辉, 教授, 主要从事非粮生物质原料和能源植物方面研究, E-mail: xiegh@cau.edu.cn

高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)因生物量大、抗逆性强和生产成本低等优点已成为应用前景较好的第二代燃料乙醇生产原料之一^[1-4]。燃料乙醇的生产主要通过发酵将生物质原料中碳水化合物转化为乙醇。能源高粱植株中碳水化合物的贮藏器官主要是茎和叶,提高茎叶产量及与能源相关品质是能源高粱育种的重要目标^[5]。已有研究主要集中在粒用高粱和饲用高粱上,对能源高粱的关注不足,特别是关于生物质高粱类型的研究。李嵩博等^[6]研究1997—2004年粒用高粱审定品种时空变化,发现粒用高粱呈单产上升和矮化趋势。皱桂花等^[7]从遗传多样性、遗传图谱构建及遗传工程研究方面梳理了能源甜高粱的遗传改良进展,但主要聚焦于含糖量相关的性状,缺乏对木质纤维素等成分的研究。此外,目前有关高粱能源品质性状评价研究主要集中在农艺性状^[8-10]、生物产量^[11]和糖纯度^[8,12]上,且这些研究性状都是基于高粱整株或茎秆。已有研究表明,提高生物产量和纤维素含量可使理论乙醇产量提高25%^[13-14]。这说明通过协同提高高粱茎叶产量及其化学成分来提高乙醇产量的可能性很大,且针对不同部位间的遗传改良更能提高能源潜力。因此,基于茎、叶产量和化学成分性状评价能源高粱杂交种,对提高能源高粱育种效率具有重要意义。

目前,有关高粱叶片产量、化学成分及其与茎产量、化学成分相关关系的研究鲜有报道。本研究以96份高粱杂交种为材料,在不同环境下分析高粱茎和叶产量及7个茎叶中与能源相关成分间的相关关系,旨在探讨实现理论乙醇产量最大化的可行性,以期能为能源高粱品种改良提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

试验于2017年在山西省介休市田堡村(37°08' N, 112°06' E)和河北省涿州市中国农业大学涿州实验站(39°28' N, 115°51' E)进行,两点均属于温带大陆性季风气候。2017年,介休市试点年均降水量为398 mm,年均气温为10.4℃;而涿州市试点年均降水量和年均气温都较高,分别为550 mm和11.6℃。按照美国农业部土壤质地的划分标准,介休市试点土壤为砂壤土,而涿州市试点为砂土。介休试点0~30 cm土层的土壤理化性质为:pH 7.4、有机质16.2 g/kg、全氮1.7 g/kg、有效磷63.3 mg/kg、速效钾362.8 mg/kg。涿州市试点

土壤pH和介休相同,但肥力较低,表现为有机质9.9 g/kg、全氮1.1 g/kg、有效磷22.7 mg/kg、速效钾80.5 mg/kg。

1.2 供试材料

选用96份高粱杂交种,由12份恢复系和8份不育系按照不完全双列杂交组配产生。12份恢复系材料和8份不育系材料的来源和类型,见表1。12份恢复系材料包括甜高粱、生物质高粱和籽粒高粱;特别是其中5份为生物质高粱类型,因其茎秆高大且籽粒产量低为能源高粱育种的优质亲本。4份A1不育系材料已被广泛用于培育多用途的高粱杂交种,其中‘AMP450’为褐色中脉突变体,木质素含量低;2份A3不育系(子代为不育杂交种)。20份亲本来源广泛,组配产生的96份杂交种有丰富的遗传多样性,具有较好的代表性。

1.3 试验设计和大田管理

96份高粱杂交种于2017年分别在介休市和涿州市试点种植,采用完全随机区组设计,3次重复,双行区,小区面积3.6 m²。所有小区的田间管理同文献^[15]。

1.4 取样及指标测定

各小区高粱成熟后,记录成熟期,取样后测定株高、茎粗、生物产量和植株中可溶性糖、纤维素、半纤维素、木质素和灰分含量,测定方法同文献^[15]。

1.5 数据分析

高粱理论乙醇产量包括可溶性糖和非可溶性糖(纤维素和半纤维素)转化的乙醇,分别按下列公式计算^[1]:

$$\text{可溶性糖转化乙醇产量} = \text{可溶性糖} \times \text{干物质产量} \times 0.51 \times 0.85 \times 1000/0.79 \quad (1)$$

$$\text{非可溶性糖转化乙醇产量} = \text{非可溶性糖} \times \text{干物质产量} \times 0.51 \times 0.85 \times 1.11 \times 0.85 \times 1000/0.79 \quad (2)$$

式(1)~(2)中:0.51,糖转化乙醇的转化系数;0.85,纤维素和半纤维素转化为糖的生产效率;0.79为乙醇密度,g/mL;1.11,纤维素、半纤维素转化为糖的转化系数。

$$\text{理论乙醇产量} = \text{可溶性糖转化乙醇产量} + \text{非可溶性糖转化乙醇产量} \quad (3)$$

采用Microsoft Excel 2016计算均值和变异系数。应用SPSS 25.0软件进行方差、相关性、主成分和多重比较分析。应用 t 检验分析试验点间的差异,所有显著性均在 $P < 0.05$ 水平。

表1 供试高粱亲本来源与类型

Table 1 Origin and types of parental sorghum lines used to generate hybrids

种质材料 Germplasm	来源 Origin	类型 Type	父母本 Male/female parent	提供单位 Provider
Awanlek	美国	甜高粱	父本	中国农业科学院作物科学研究所
X097	中国	甜高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
X098	中国	甜高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
Tiansi-1	中国	甜高粱	父本	北京市绿能可再生能源有限公司
NW2008-1	中国	生物质高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
NW2008-2	中国	生物质高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
NW2008-3	中国	生物质高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
NW2008-6	中国	生物质高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
NW2008-21	中国	生物质高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
HN2013	中国	籽粒高粱	父本	中国农业大学国家非粮能源生物质原料研发中心
J7645zao	中国	籽粒高粱	父本	山西省农业科学院高粱研究所
Katemu	肯尼亚	籽粒高粱	父本	美国植物遗传资源保藏中心
AMP439	美国	A1 不育系	母本	美国植物遗传资源保藏中心
AMP450	美国	A1 不育系	母本	美国植物遗传资源保藏中心
ATx622	美国	A1 不育系	母本	中国农业科学院作物科学研究所
ATx623	美国	A1 不育系	母本	中国农业科学院作物科学研究所
ATx624	美国	A1 不育系	母本	中国农业科学院作物科学研究所
ATx2924	美国	A1 不育系	母本	美国植物遗传资源保藏中心
A3SC103-12E	美国	A3 不育系	母本	美国植物遗传资源保藏中心
A3SM100	美国	A3 不育系	母本	美国植物遗传资源保藏中心

2 结果与分析

2.1 能源相关性状的方差分析

由表2可知,除叶的木质素含量外,基因型对供试能源高粱茎和叶所有性状的影响均达极显著水平($P < 0.01$)。环境因子对所有研究性状的影响达显著水平。基因型与环境互作显著影响茎的产量、可溶性糖含量、纤维素含量、半纤维素含量、木质素含量、灰分含量、理论乙醇产量和叶的半纤维素含量($P < 0.05$)。由均方值大小可知,除茎半纤维素含量变异主要来源于基因型差异外,其他性状变异绝大部分来源于环境间的差异,表明茎产量、茎可溶性糖含量、茎纤维素含量、茎木质素含量、茎灰分含量、茎理论乙醇产量、叶产量、叶可溶性糖含量、叶纤维

素含量、叶半纤维素含量、叶木质素含量、叶灰分含量和叶理论乙醇产量主要受环境影响。茎半纤维素含量的遗传较为稳定。

2.2 能源相关性状的变异分析

由表3可知,2个试点茎叶产量和化学成分的变异系数范围为介休市3.7%~61.3%,涿州市4.8%~60.0%。2个试点茎叶产量和理论乙醇产量变异系数较大,其变异系数均 $> 40\%$ 。2个试点高粱品质性状的变异幅度在茎叶表现均一致,即可溶性糖含量和灰分含量变异系数较大,而纤维素、半纤维素和木质素含量变异系数较低。总体而言,叶的品质性状变异系数表现小于茎,特别是叶的纤维素、半纤维素和木质素的含量在2个试点的变异系数均 $< 10\%$,说明叶的品质性状遗传较稳定。

表2 高粱杂交种茎叶产量和能源品质性状方差分析

Table 2 Mean squares from combined analysis of variance for the traits measured across environments

性状 Trait	变异来源 Source of variation	均方 Mean square	
		茎 Stem	叶 Leaf
产量 Yield	基因型	848.85***	70.53***
	环境	21 221.95***	204.99***
	基因型×环境	143.64*	13.84
可溶性糖含量 Soluble sugar content	基因型	32 814.37***	676.09**
	环境	117 522.81***	15 630.68***
	基因型×环境	4 680.52**	477.00
纤维素含量 Cellulose content	基因型	5 085.76***	277.50***
	环境	78 223.78***	4 971.05***
	基因型×环境	1217.62***	163.90
半纤维素含量 Hemicellulose content	基因型	4 231.79***	146.18***
	环境	2 376.04*	3 511.15***
	基因型×环境	881.81***	111.39***
木质素含量 Lignin content	基因型	1 845.05***	87.48
	环境	26 081.62***	15 162.97***
	基因型×环境	418.58**	84.58
灰分含量 Ash content	基因型	603.48***	307.71***
	环境	1 008.66***	1 702.20**
	基因型×环境	137.61***	173.77
理论乙醇产量 Theoretical ethanol yield	基因型	115 769 125.67***	6 177 816.12***
	环境	3 642 864 472.15***	11 217 712.66**
	基因型×环境	21 349 737.41*	1 145 374.30

注：*、**和***分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上显著。下同。

Note: *, ** and *** indicate significantly different at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively. The same below.

2.3 能源相关性状的的相关性分析

由表4可知,2个试点茎和叶的产量与理论乙醇产量均表现为极显著正相关($P<0.01$), R^2 均为0.99,表明生物产量是影响理论乙醇产量的最重要因素。2个试点的茎和叶的产量也极显著正相关($P<0.01$),介休市和涿州市的试点相关系数分别为0.83和0.85。茎的理论乙醇产量与叶的理论乙醇产量也极显著正相关($P<0.01$),介休市和涿州市的试点相关系数分别为0.82和0.84。产量和品质性状之间,2个试点均表现为茎产量和茎可溶性糖含量显著正相关,而与茎灰分含量显著负相关;叶产量和叶纤维素含量显著

正相关。

同一品质性状,2个试点均表现为茎可溶性糖含量与叶可溶性糖含量、茎木质素含量与叶木质素含量均呈极显著正相关。介休市试点茎纤维素含量和叶纤维素含量表现为不相关,涿州市试点茎纤维素含量和叶纤维素含量呈显著正相关。品质性状间,茎可溶性糖含量和茎木质纤维素含量呈显著负相关;茎可溶性糖含量与茎灰分含量呈显著负相关,而叶可溶性糖含量与叶灰分含量在2试点表现不一致。2个试点茎和叶均表现为:纤维素含量与半纤维素含量、木质素含量均呈显著正相关;半纤维素含量和木质素含量呈显著正相关。

表 3 高粱杂交种茎叶产量和品质性状变异分析
Table 3 Variations of tested parameters of sorghum hybrids

地点 Site	器官 Organ	指标 Parameter	最大值 Max	最小值 Min	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数/% CV
介休市	茎	产量/(t/hm ²)	62.2	1.8	19.4	11.5	59.4
		可溶性糖含量/(g/kg)	429.6	21.6	229.3	88.9	38.8
		纤维素含量/(g/kg)	352.3	132.7	238.0	35.9	15.1
		半纤维素含量/(g/kg)	286.2	100.7	176.5	36.3	20.6
		木质素含量/(g/kg)	181.1	70.3	122.1	21.5	17.6
		灰分含量/(g/kg)	85.5	20.5	41.8	13.3	31.9
		理论乙醇产量/(L/hm ²)	23 326.4	592.9	6 681.6	4 096.3	61.3
Jiexiu	叶	产量/(t/hm ²)	30.2	2.5	10.1	4.5	44.5
		可溶性糖含量/(g/kg)	117.8	16.7	70.4	19.6	27.9
		纤维素含量/(g/kg)	304.5	245.8	271.4	11.7	4.3
		半纤维素含量/(g/kg)	238.8	187.3	213.4	8.0	3.7
		木质素含量/(g/kg)	149.6	110.1	128.1	7.5	5.8
		灰分含量/(g/kg)	122.1	64.9	90.8	10.0	11.0
		理论乙醇产量/(L/hm ²)	8 342.4	671.9	2 929.4	1 343.9	45.9
涿州市	茎	产量/(t/hm ²)	100.8	2.0	31.5	18.6	59.1
		可溶性糖含量/(g/kg)	444.0	29.2	258.4	94.2	36.5
		纤维素含量/(g/kg)	379.3	162.9	261.3	43.3	16.6
		半纤维素含量/(g/kg)	259.7	107.4	172.3	30.9	17.9
		木质素含量/(g/kg)	218.0	70.9	135.5	25.9	19.1
		灰分含量/(g/kg)	91.0	11.9	39.2	13.3	34.0
		理论乙醇产量/(L/hm ²)	37 358.6	621.8	11 719.2	7 032.3	60.0
Zhuozhou	叶	产量/(t/hm ²)	41.4	2.6	11.3	5.4	48.0
		可溶性糖含量/(g/kg)	270.5	3.3	60.0	24.0	40.1
		纤维素含量/(g/kg)	315.2	207.0	277.3	13.4	4.8
		半纤维素含量/(g/kg)	239.1	144.7	208.4	10.5	5.1
		木质素含量/(g/kg)	166.7	110.4	138.3	9.7	7.0
		灰分含量/(g/kg)	279.2	41.7	87.4	16.7	19.2
		理论乙醇产量/(L/hm ²)	12 370.3	732.1	3 210.3	1 554.9	48.4

2.4 主成分分析

由表5可知,2个试点特征值 >1 的主成分均为4个,其累计贡献率为介休市84.22%,涿州市78.95%,涵盖了高粱杂交种性状研究的绝大部分信息。

在介休市试点,第1主成分特征值为4.14,贡献率为29.57%;其中第1主成分中叶产量和叶的理论乙醇产量特征向量绝对值最大均为0.95,其次为茎产量(0.94)和茎的理论乙醇产量(0.91),因此将第1主成分称为秸秆产量因子。第2主成分的贡献率为27.85%;其特征向量绝对值最大的性状为茎可溶性糖含量(-0.93),其次是为茎半纤维素含

量(0.91)、茎纤维素含量(0.91)、茎木质素含量(0.90),且茎木质纤维素含量的特征向量绝对值均 >0.90 ,因此将第2主成分称为茎的碳水化合物因子。第3主成分特征向量绝对值最大的性状为叶半纤维素含量(0.90),其次是叶纤维素含量(0.76)、叶木质素含量(0.44)、叶可溶性糖含量(-0.38),因此将其称为叶的碳水化合物因子。第4主成分特征向量绝对值最大的性状为叶的灰分含量(0.81),其次是叶可溶性糖含量(-0.73),且叶产量、叶可溶性糖含量、叶半纤维素含量和叶理论乙醇产量特征值均为负值,因此将其称为叶乙醇产量潜力的抑制因子。

表5 高粱杂交种茎叶产量和品质性状主成分分析

Table 5 Principal component analysis of characters in sorghum hybrids

指标 Parameter	介休市 Jiexiu				涿州市 Zhuozhou			
	第1 主成分	第2 主成分	第3 主成分	第4 主成分	第1 主成分	第2 主成分	第3 主成分	第4 主成分
茎产量	0.94	-0.20	0.13	0.01	0.95	0.03	0.11	0.04
茎可溶性糖含量	0.23	-0.93	0.00	-0.17	0.18	-0.95	-0.01	-0.11
茎纤维素含量	-0.04	0.91	0.11	0.15	0.18	0.93	0.06	0.12
茎半纤维素含量	-0.32	0.91	-0.01	0.16	-0.12	0.97	0.07	0.08
茎木质素含量	0.05	0.90	0.13	0.15	0.12	0.96	0.09	0.11
茎灰分含量	-0.56	0.52	-0.23	0.19	-0.65	0.01	0.10	0.12
茎理论乙醇产量	0.91	-0.25	0.13	-0.00	0.95	-0.03	0.10	0.04
叶产量	0.95	-0.01	-0.01	-0.07	0.92	0.01	0.09	0.11
叶可溶性糖含量	0.14	-0.28	-0.38	-0.73	0.08	-0.29	-0.36	-0.51
叶纤维素含量	0.34	-0.03	0.76	0.13	0.16	0.01	0.39	0.57
叶半纤维素含量	0.01	0.11	0.90	-0.02	0.05	0.25	0.77	0.25
叶木质素含量	-0.18	0.29	0.44	0.69	0.01	0.14	-0.10	0.88
叶灰分含量	0.03	0.13	-0.31	0.81	-0.11	0.06	-0.87	0.02
叶理论乙醇产量	0.95	-0.02	0.02	-0.12	0.92	-0.01	0.11	0.10
特征值	4.14	3.90	1.92	1.83	4.07	3.78	1.70	1.51
贡献率/%	29.57	27.85	13.74	13.07	29.04	27.0	12.15	10.77
累计贡献率/%	29.57	57.41	71.15	84.22	29.04	56.04	68.19	78.95

在涿州市试点,第1主成分特征值为4.07,贡献率为29.04%;第1主成分中茎的理论乙醇产量和茎的产量特征向量绝对值最大均为0.95,其次叶的理论乙醇产量(0.92)和叶的产量(0.92),因此将第1主成分称为秸秆产量因子。第2主成分特征向

量绝对值前四位分别为茎半纤维素含量(0.97)、茎木质素含量(0.96)、茎可溶性糖含量(-0.95)和茎纤维素含量(0.93),因此称为茎的碳水化合物因子。第3主成分特征向量绝对值前四位分别为叶灰分含量(-0.87)、叶半纤维素含量(0.77)、叶纤维素含量

(0.39)和叶可溶性糖含量(-0.36)主要反映高粱叶的能源品质性状潜力,因此称为叶的碳水化合物因子。第4主成分特征向量绝对值最大的性状为叶木质素含量(0.88),其次是叶纤维素含量(0.57),且其叶的产量、叶纤维素含量、叶半纤维素含量和叶的理论乙醇产量特征值均为正值,因此将其称为叶乙醇产量的促进因子。

3 讨论与结论

本研究96份高粱的绝大多数能源相关性状的基因型、环境及两者互作效应均达显著水平,且性状变异主要来源于环境因素。已有研究也表明能源高粱生物产量和化学成分受环境影响较大。Zhao等^[16]和Tang等^[17]对高粱的乙醇生产潜力及其产量构成性状研究发现,能源高粱生物产量、可溶性糖和木质纤维素受环境影响显著。此外,陈展宇等^[18]在半干旱和半湿润地区对8个甜高粱农艺性状、糖锤度和生物产量性状研究发现,7个甜高粱糖锤度在2个不同环境下差异显著。因此,在不同环境条件下分析高粱茎叶各性状间的相关关系是必要的。

明确茎、叶的产量以及其化学成分含量间的关系,有助于提高茎叶产量和改善其能源品质,这在一定程度上决定了非粮生物质原料的能源潜力。Murray等^[13-14]基于甜高粱和籽粒高粱的双亲重组近交群体对结构性和非结构化碳水化合物的遗传研究表明,高粱在适宜条件下,不同碳水化合物含量可协同提高,同时QTL(quantitative trait locus)定位发现茎和叶的碳水化合物遗传是独立的,因此分别对茎和叶遗传改良可有效地改良其能源品质。本研究发现,茎的理论乙醇产量和叶的理论乙醇产量极显著正相关,且在2个试点的相关系数均较大。同一能源品质性状不同部位间,绝大部分品质性状在2个试点均表现为正相关。茎的可溶性糖含量与叶可溶性糖含量、茎半纤维素含量与叶半纤维素含量、茎木质素含量与叶木质素含量均呈极显著正相关。因此,从表型相关而言,同时提高茎和叶的产量并改善其能源品质可极大地提升能源高粱乙醇理论生产潜力。另外,介休市和涿州市试点第1和第2主成分均为秸秆产量和茎碳水化合物因子,表明能源高粱育种应重视提高茎、叶产量及茎的碳水化合物因子的改良。然而,第4主成分中叶产量、叶半纤维素含量和叶的理论乙醇产量特征值在2个试点表现不一致,在介休市为负值,涿州市为正值。这可能与能

源高粱叶的能源品质性状受环境影响较大有关。在华北平原不同试点对能源高粱木质纤维素等成分的配合力分析也表明叶中化学成分的遗传效应在不同环境下表现不一致^[19]。

作物性状在不同生态环境下基因和环境互作效应显著^[20]。本研究茎和叶产量及其能源相关化学成分7个性状的方差分析也表明,能源高粱品种的产量和化学成分受环境影响较大,性状间的相关关系可能在不同环境下会变化。因此,应该在多个生态环境下,结合QTL定位分析茎叶能源性状间遗传关系以获得更加可靠结果。

参考文献 References

- [1] Rooney W L, Blumenthal J M, Bean B W, Mullet J E. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock[J]. *Biofuels Bioproduction and Biorefining*, 2007, 1(2): 147-157
- [2] Tew T L, Cobill R M, Richard E P. Evaluation of sweet sorghum and sorghum × sudangrass hybrids as feedstocks for ethanol production[J]. *Bioenergy Research*, 2008, 1(2): 147-152
- [3] 谢光辉. 非粮生物质原料体系研发进展及方向[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 1-19
Xie G H. Progress and direction of non-food biomass feedstock supply research and development in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6): 1-19 (in Chinese)
- [4] Yu J L, Zhang X, Tan T W. Ethanol production by solid state fermentation of sweet sorghum using thermotolerant yeast strain[J]. *Fuel Process Technology*, 2008, 89(11): 1056-1059
- [5] McKinley B A, Olson S N, Ritter K B, Her D W, Kariem S D, Lu F H, Ralph J, Rooney W L, Mullet J E. Variation in energy sorghum hybrid TX08001 biomass composition and lignin chemistry during development under irrigated and non-irrigated field conditions[J]. *Plos One*, 2018, 4(13): 5-25
- [6] 李嵩博,唐朝臣,陈峰,谢光辉. 中国粒用高粱改良品种的产量和品质性状时空变化[J]. 中国农业科学, 2018, 51(2): 246-256
Li S B, Tang C C, Chen F, Xie G H. Temporal and spatial changes in yield and quality with grain sorghum variety improvement in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(2): 246-256 (in Chinese)
- [7] 邹桂花,陶跃之. 能源甜高粱遗传改良研究进展[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12): 63-67
Zhou G H, Tao Y Z. Progress of genetic improvement in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L Moench)[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(12): 63-67 (in

- Chinese)
- [8] 罗峰,李欣禹,唐朝臣,刘惠芬,裴忠有,孙守钧. 影响甜高粱主要农艺和品质性状的环境因子剖析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 10-17
Luo F, Li X Y, Tang C C, Liu H F, Pei Z Y, Sun S J. Analysis of environment factors affecting the main agronomic and quality traits of sweet sorghum [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(10):10-17 (in Chinese)
- [9] 刘洋,罗萍,林希昊,苏俊波. 甜高粱主要农艺性状相关性及遗传多样性初析[J]. 热带作物学报, 2011, 32(6):1004-1008
Liu Y, Luo P, Lin X H, Su J B. Correlation and genetic diversity analysis of main agronomic characters in different sweet sorghum germplasm [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(6): 1004-1008 (in Chinese)
- [10] 冯国郡,李宏琪,叶凯,李桂英,涂振东,郭建富. 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
Feng G J, Li H Q, Ye K, Li G Y, Tu Z D, Guo J F. Genetic diversity and cluster analysis of sweet sorghum germplasm in Xinjiang [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2012, 13(3): 398-405 (in Chinese)
- [11] 韩东倩,韩立朴,薛帅,尤明山,谢光辉. 基于能源利用的高粱配合力和杂种优势分析[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(1): 26-32
Han D Q, Han L P, Xue S, You M S, Xie G H. Combining ability and heterosis of sorghum for biomass energy [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(1): 26-32 (in Chinese)
- [12] 李欧静,佟德清,李金旺,陈鹏,吕建澎,段霞飞,裴忠有. 甜高粱 (*Sorghum bicolor* L Beauv) 茎秆相关性状遗传分析[J]. 分子植物育种, 2017, 15(9): 3560-3567
Li O J, Tong D Q, Li J W, Chen P, Lv J P, Duan X F, Pei Z Y. Genetic analysis of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L Beauv) related traits [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(9): 3560-3567 (in Chinese)
- [13] Murray S C, Sharma A, Rooney W L, Klein P E, Mullet J E, Mitchell S E, Kresovich S. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: I QTL for stem sugar and grain nonstructural carbohydrates [J]. *Crop Science*, 2008, 48(6): 2165-2179
- [14] Murray S C, Sharma A, Rooney W L, Klein P E, Mullet J E, Mitchell S E, Kresovich S. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: II QTL for stem and leaf structural carbohydrates [J]. *Crop Science*, 2008, 48(6): 2180-2193
- [15] 许依,唐朝臣,何思洋,周方圆,孙磊,李嵩博,谢光辉. 62份从美国引进高粱不育系能源相关产量和品质性状评价[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(6): 1-11
Xu Y, Tang C C, He S Y, Zhou F Y, Sun L, Li S B, Xie G H. Identification and evaluation of germplasm of 62 sorghum sterile lines introduced from American based on yield and quality and quality traits for energy utilization [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(6): 1-11 (in Chinese)
- [16] Tang C C, Li S B, Li M, Xie G H. Bioethanol potential of energy sorghum grown on marginal and arable lands [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9(2): 450-461
- [17] Zhao Y L, Dolat A, Steinberger Y, Wang X, Osman A, Xie G H. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1): 55-64
- [18] 陈展宇,邓川,边鸣镝,白忠义,杨振明. 不同生态环境对甜高粱生长、糖锤度及产量的影响[J]. 作物杂志, 2013(1): 58-62
Chen Z Y, Deng C, Bian M D, Bai Z Y, Yang Z M. The effects of different habitats on the growth, brix degree and yield of *Sorghum bicolor* L [J]. *Crops*, 2013(1): 58-62 (in Chinese)
- [19] 许依. 基于燃料乙醇用途的高粱种质资源评价和筛选 [D]. 北京: 中国农业大学, 2020
Xu Y. Assessment and screening of sorghum germplasm for the fuel ethanol purpose [D]. Beijing: China Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [20] 李欣禹,罗峰,刘惠芬,裴忠有,高建明,姜亦巍,孙守钧. 不同类型高粱与环境的相互作用关系 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(4): 59-63
Li X Y, Luo F, Liu H F, Pei Z Y, Gao J M, Jiang Y W, Sun S J. Interaction between different types of sorghum and environment [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(4): 59-63 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅