

密度及氮、磷、钾配比对甜高粱生物产量 和茎秆含糖锤度的影响

王艳秋 邹剑秋* 张志鹏 朱凯 张飞

(辽宁省农业科学院 高粱研究所,沈阳 110161)

摘要 试验在沈阳进行,土壤为草甸土。采用4因素5水平二次回归通用旋转组合设计,研究了当前生产上有代表性的甜高粱品种辽甜1号的种植密度、氮肥、磷肥和钾肥对生物产量和茎秆含糖锤度的影响,并通过模拟寻优,确定最优化措施方案。结果表明:4因子与生物产量和含糖锤度均存在显著的回归关系,对产量的影响效应为: $N > \text{密度} > K > P$,密度和N、P和K互作对产量的影响效应较大,对含糖锤度的影响效应为 $N > K > P > \text{密度}$ 。4因子均在0水平时,即密度为75 000株/hm²,施N 150 kg/hm²,施P₂O₅ 138 kg/hm²,施K₂O 60 kg/hm²时为最佳栽培方案,最高生物产量可达112.70 t/hm²,茎秆平均含糖锤度可达18.41%。

关键词 甜高粱; 密度; 肥料; 生物产量; 含糖锤度

中图分类号 S 514

文章编号 1007-4333(2012)06-0103-08

文献标志码 A

Effects on Sweet sorghum biomass and stalk sugar content of different density and fertilizer combination

WANG Yan-qiu, ZOU Jian-qiu*, ZHANG Zhi-peng, ZHU Kai, ZHANG Fei

(Sorghum Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract Experiment was done in meadow soil of Shenyang. Quadratic regression universal rotary combination design experiment of four factors and five levels was used to study the effects of different density and fertilizer combination on biomass and stalk sugar content of current representative sweet sorghum varieties Liaotian No. 1. Optimum formula was found by simulated equation and optimality selection. The results showed that: planting density biomass and dose of N, P, K all have a significant regression relationship with biomass planting density. The effect on biomass was $N > \text{density} > P > K$, there was larger effect for biomass on density and P, N and K interaction. The influence on stalk sugar content (Brix) was $N > K > P > \text{density}$. The best design is that four factors are all at 0 level, that is, density at 75 000 plant/hm², N 150 kg/hm², P₂O₅ 138 kg/hm², K₂O 60 kg/hm², it could attain a maximum biomass of 112.70 t/hm² and an average stalk sugar content (Brix) of 18.41%.

Key words sweet sorghum; density; fertilizer treatments; biomass; brix

能源甜高粱是新兴的可再生能源作物,具有生物学产量高、茎秆含糖量高、抗旱耐盐碱能力强、种植范围广、乙醇转化率高等特点,有利于促进边际性土地增产增效^[1-3]。甜高粱获得高产高效除了受品种影响外,栽培技术措施如栽培管理,适宜密植和合

理施肥也具有重要作用。

肥料是作物生长必需的营养元素,可改善土壤性质、提高土壤肥力水平,是农业生产的物质基础之一^[4]。作物对磷、氮、钾的需求量较大,土壤中已有的磷、氮、钾的含量通常不能满足其生长需求,需要

收稿日期:2012-05-15

基金项目:农业部现代农业产业技术体系项目(CARS-06);公益性行业(农业)科研专项经费项目(nyhyzx07-011);国际合作项目(CFC/FIGG/41);辽宁省科技基金博士启动项目(20061045);948项目(2012-Z54)

第一作者:王艳秋,副研究员,硕士,主要从事高粱遗传育种研究,E-mail:linsnkygls@yahoo.com.cn

通讯作者:邹剑秋,研究员,博士,主要从事高粱遗传育种研究,E-mail:jianqiu Zhou@yahoo.com.cn

施用含氮、磷、钾的化肥来补足^[5-6]。目前,甜高粱施肥还存在着用量大、配比不合理、利用率低等问题,不仅不能提高产量,还造成资源浪费、成本提高、农田及环境污染。因此,合理施用肥料、提高肥料利用率对农业的可持续发展和环境保护等均具有重要意义。

密度是产量构成因素之一。在一定范围内,增加密度,可扩大叶面积,增加光合产物,从而提高产量^[7-10]。但密度过大,会使单株生产能力下降,茎秆细弱,以致出现倒伏。因此,只有合理密植,才能充分利用光照、空间和地力,提高叶面积指数,增加植株光合效率和光合产物的积累,从而提高生物产量。

甜高粱是新型能源作物,对其合理施肥的研究不多。近年来,通过采用D-饱和和最优设计,对氮、磷、钾肥的施肥效果进行研究,通过建立总糖和生物量的效应函数和回归分析,得出氮肥和钾肥对甜高粱总糖和生物量的作用较大,磷肥效果次之^[11]。因此,为了解不同肥料配比与甜高粱生物产量和糖分积累间的关系,本试验选取能源专用型甜高粱杂交

种辽甜1号为试材,采用二次通用旋转回归组合设计方法,探讨密度、氮、磷和钾肥配合施用对甜高粱产量和茎秆含糖锤度的影响,寻求各因子的最优配比方案,为能源作物甜高粱的高产高效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验品种为辽甜1号,由辽宁省农业科学院高粱研究所选育并提供,试验地点在辽宁省农业科学院(沈阳)试验地进行。试验地的土壤养分状况为:全氮0.110%,全磷0.170%,全钾2.229%,水解性氮74 mg/kg,有效磷16.04 mg/kg,有效钾143 mg/kg, pH 6.2。

1.2 试验设计

试验采用二次回归通用旋转组合设计方法。4个因素为密度、纯N、P₂O₅和K₂O,5水平见表1。通过正交试验得31个不同肥料配比处理见表2,试验编码为25~31区重复种植于试验地中。

表1 试验因素水平编码表

Table 1 Level codes of experimental factors

试验因素	变化间距	变量编码水平				
		-2	-1	0	1	2
X ₁ (密度)/(株/hm ²)	7 500	60 000	67 500	75 000	82 500	90 000
X ₂ (纯N)/(kg/hm ²)	75	0	75	150	225	300
X ₃ (P ₂ O ₅)/(kg/hm ²)	69	0	69	138	207	276
X ₄ (K ₂ O)/(kg/hm ²)	30	0	30	60	90	120

试验设计6行区,行距0.6 m,行长3 m,小区面积7.2 m²。2008年5月6日播种,10月9日收获,2009年5月6日播种,10月3日收获,田间管理同当地生产水平相一致。试验设5个密度处理,分别为60 000、67 500、75 000、82 500和90 000株/hm²。

2/3的氮肥以种肥形式一次施入,磷酸二铵(N≥15%);硫酸铵(N≥20%)=1:1;1/3的氮肥在拔节期追施,尿素(N≥46%);磷肥以种肥形式一次施入,磷酸二铵(P₂O₅≥46%);过磷酸钙(P₂O₅≥25%)=1:1;钾肥以种肥形式一次施入,硫酸钾(K₂O≥48%)。

1.3 测定指标

生物产量的测定:用台秤测量生物产量,收获时取中间4行全部收获称其鲜重。含糖锤度的测定:采用PAL-1型糖度计,分别在籽粒灌浆(8月15日)后10、20、30、40和50 d(籽粒成熟期),每小区选择有代表性的植株10株进行测定,分别测定植株上数(除穗柄外)第4、7、10节的含糖锤度,测定部位为节间中部。

1.4 试验统计方法

采用Excel和DPS 6.50数据处理系统,对数据进行处理和分析^[12]。

2 结果与分析

2.1 不同密度及 N、P、K 配比生物产量比较

2.1.1 生物产量模型的建立及显著性检验

对 31 个处理编码值和甜高粱生物产量进行统计分析(表 2),得到了生物产量(Y)与密度(X_1)、氮(X_2)、磷(X_3)和钾(X_4)4 个因子在编码空间的多元回归模型:

$$Y = 112.70 + 0.92X_1 - 0.45X_2 - 3.44X_3 - 1.03X_4 - 6.58X_1^2 - 7.542X_2^2 - 4.54X_3^2 - 3.10X_4^2 + 0.65X_1X_2 + 3.07X_1X_3 - 0.35X_1X_4 - 2.59X_2X_3 - 1.98X_2X_4 - 1.69X_3X_4$$

方差分析结果表明(表 3),方程回归差异极显著($F_2 = 12.46 > F_{0.01(14,16)} = 3.45$),失拟差异不显著($F_1 = 0.293 < F_{0.05(10,6)} = 4.06$),表明方程拟合程度较好。密度、氮、磷和钾肥 4 个因子与甜高粱生物产量存在显著的回归关系,该二次方程能真实地反映目标函数与试验因子间的数量变化关系。尽管有些回归系数不显著,但由于方程是非线性的,并且不存在同一个因素的一次项、二次项及相关交互项不显著的情况,故不考虑剔除不显著的系数,可用原方程进行预测。

2.1.2 生物产量模型的解析与寻优

2.1.2.1 模型中各因子的最优配比

模型模拟寻优的目的就是通过对各试验因子在不同配比方案下与生物产量的变化规律进行研究,寻求其理想的平衡关系,即各因子综合作用的结果使函数值达到最大。试验码值[-2~2]条件下, $X_1 = 0, X_2 = 0, X_3 = 0, X_4 = 0$ 时,即密度为 75 000 株/hm²,施 N 150 kg/hm²,施 P 138 kg/hm²,施 K 60 kg/hm² 时,可达最高产量 112.70 t/hm²。此方案为该回归模型中各因子的最优配比。

2.1.2.2 模型中各因子的最优方案

本试验在 625 个组合中(除密度、氮肥、磷肥和钾肥均在 0 水平的重复外),从 95% 的置信区间内确定出不同目标产量下的组合方案。生物产量高于 95.86 t/hm² 的组合有 58 个。其综合农艺措施为:种植密度 67 545~80 905 株/hm²,平均 74 225 株/hm²;N 137.40~162.60 kg/hm²,平均 150.00 kg/hm²;P₂O₅ 94.02~117.74 kg/hm²,平均 105.88 kg/hm²;K₂O 52.87~67.15 kg/hm²,平均 60.01 kg/hm²(表 4)。

表 2 试验因子结构矩阵与生物产量结果

Table 2 Result of biomass and factor structure matrix

编 码	试验水平				产量/ (t/hm ²)
	密度(X_1)	氮肥(X_2)	磷肥(X_3)	钾肥(X_4)	
1	1	1	1	1	86.33
2	1	1	1	-1	92.36
3	1	1	-1	1	92.64
4	1	1	-1	-1	95.83
5	1	-1	1	1	89.58
6	1	-1	1	-1	94.50
7	1	-1	-1	1	93.06
8	1	-1	-1	-1	84.72
9	-1	1	1	1	73.61
10	-1	1	1	-1	83.33
11	-1	1	-1	1	98.06
12	-1	1	-1	-1	97.92
13	-1	-1	1	1	88.19
14	-1	-1	1	-1	84.03
15	-1	-1	-1	1	95.56
16	-1	-1	-1	-1	90.28
17	-2	0	0	0	87.28
18	2	0	0	0	89.28
19	0	-2	0	0	87.22
20	0	2	0	0	81.69
21	0	0	-2	0	103.06
22	0	0	2	0	89.86
23	0	0	0	-2	106.94
24	0	0	0	2	97.50
25	0	0	0	0	118.06
26	0	0	0	0	119.44
27	0	0	0	0	111.11
28	0	0	0	0	102.78
29	0	0	0	0	108.33
30	0	0	0	0	118.06
31	0	0	0	0	111.11

表3 生物产量方差分析表

Table 3 Results of variance analysis for biomass

变异来源	平方和	自由度	均方	比值 F	P 值
X_1	11,291.9	1	11,291.9	0.5387	0.4736
X_2	2,761.8	1	2,761.8	0.1317	0.7214
X_3	158,370.2	1	158,370.2	7.5548	0.0143
X_4	14,320.2	1	14,320.2	0.6831	0.4207
X_1^2	690,787.4	1	690,787.4	32.9531	0.0001
X_2^2	906,147.2	1	906,147.2	43.2266	0.0001
X_3^2	328,143.0	1	328,143.0	15.6536	0.0011
X_4^2	152,845.9	1	152,845.9	7.2913	0.0158
$X_1 X_2$	3,800.5	1	3,800.5	0.1813	0.6759
$X_1 X_3$	84,336.0	1	84,336.0	4.0231	0.0621
$X_1 X_4$	1,117.0	1	1,117.0	0.0533	0.8204
$X_2 X_3$	60,052.6	1	60,052.6	2.8647	0.1099
$X_2 X_4$	34,950.8	1	34,950.8	1.6673	0.2150
$X_3 X_4$	25,570.1	1	25,570.1	1.2198	0.2857
回归	3 658,271.3	14	261,305.1	$F_2 = 12.465$	0.0001
剩余	335,403.6	16	20,962.7	$F_1 = 0.293$	0.9730
失拟	109,957.3	10	10,995.7		
误差	225,446.3	6	37,574.4		
总和	3 993,674.9	30			

注: $F_{0.05(10,6)} = 4.06$, $F_{0.01(10,6)} = 7.87$; $F_{0.05(14,16)} = 2.37$, $F_{0.01(14,16)} = 3.45$ 。

表4 实现目标生物产量 ≥ 95.86 t/hm² 密度与施肥优化组合Table 4 Optimized density and fertilizer combination for realizing biomass ≥ 95.86 t/hm²

编码水平	密度(X_1)		氮肥(X_2)		磷肥(X_3)		钾肥(X_4)	
	频数	频率	频数	频率	频数	频率	频数	频率
-2	0	0	0	0	6	0.1034	2	0.0345
-1	17	0.2931	12	0.2069	23	0.3966	16	0.2759
0	30	0.5172	34	0.5862	21	0.3621	22	0.3793
1	11	0.1897	12	0.2069	8	0.1379	16	0.2759
2	0	0	0	0	0	0	2	0.0345
加权均数	-0.103		0		-0.466		0	
标准误	0.09		0.084		0.112		0.119	
95%置信区间	-0.280~0.073		-0.166~0.166		-0.686~-0.245		-0.234~0.234	
农艺措施	67 545~80 905 株/hm ²		137.40~162.60 kg/hm ²		94.02~117.74 kg/hm ²		52.87~67.15 kg/hm ²	

2.1.2.3 单因子效应分析

由图 1 可以看出,随着码值的增大,生物产量呈抛物线状变化,但各因子对生物产量的影响程度存在差异。为了解各因子对生物产量影响程度的强弱,以便有针对性的对其进行研究,采用降维法对生物产量进行回归模拟,可得到种植密度、N、P 和 K 一元降维偏因子回归模型:

$$Y_{\text{密度}(X_1)} = -1.64X_1^2 + 16.45X_1 + 71.57,$$

$$Y_{\text{氮肥}(X_2)} = -1.88X_2^2 + 18.84X_2 + 65.59,$$

$$Y_{\text{磷肥}(X_3)} = -1.13X_3^2 + 9.62X_3 + 92.95,$$

$$Y_{\text{钾肥}(X_4)} = -0.77X_4^2 + 7.74X_4 + 93.35.$$

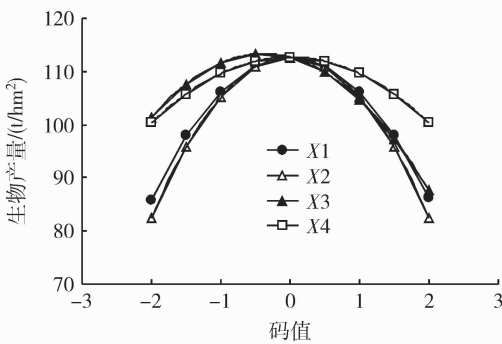


图 1 单因子对甜高粱生物产量的效应
Fig.1 Effects of Single-factor on sweet sorghum biomass

在码值[-2~2]范围内,根据函数性质和边际平衡原理,对以上各回归方程分别求一阶偏导数,并使一阶偏导数为零,得各因子边际生物产量方程为:

$$Y_{\text{密度}(X_1)} = -1.65X_1 + 32.90,$$

$$Y_{\text{氮肥}(X_2)} = -1.88X_2 + 37.68,$$

$$Y_{\text{磷肥}(X_3)} = -1.14X_3 + 19.24,$$

$$Y_{\text{钾肥}(X_4)} = -0.77X_4 + 15.48.$$

在 4 因素二次通用旋转组合设计中,各码值在编码空间中均处于平等的地位,所以方程的回归系数可以直接反映因子的作用大小,其符号则反映该因子的作用方向^[10]。由回归子方程可以看出,在-2 至 0 水平,各因子对产量的影响程度:N(X₂)>密度(X₁)>K(X₄)>P(X₃);在 0 至 2 水平,各因子对产量的影响程度:N(X₂)>密度(X₁)>P(X₃)>K(X₄)。由图 1 可知,密度过大或肥料施用过量都会

对生物产量造成不良影响,在一定范围内会造成相应递减,而超过一定程度会造成群体产量下降。因此研究各因子与生物产量的关系,确定其高产的最优配比对甜高粱产量潜力的发挥至关重要。

2.2 不同密度及 N、P、K 配比的茎秆含糖锤度分析

2.2.1 不同密度及 N、P、K 配比的茎秆各节平均含糖锤度的模型模拟

对含糖锤度(Y)与密度(X₁)、N(X₂)、P(X₃)和 K(X₄)4 个因子在编码空间进行数学模拟,根据表 5 剔除不显著项,可得多元回归模型:

$$Y = 16.59 - 0.55X_1 + 0.27X_2 - 0.41X_1^2 - 0.54X_2^2 - 0.49X_3^2 - 0.50X_4^2$$

方程回归差异极显著(F₂ = 4.08 > F_{0.01}(14, 16) = 3.45),失拟差异不显著(F₁ = 2.65 < F_{0.05}(10, 6) = 4.06)。对其求导可得方程:Y = -0.28 - 0.82X₁ - 1.08X₂ - 0.99X₃ - 0.82X₄,说明对含糖锤度的影响程度 N(1.080 56) > K(0.996 06) > P(0.993 06) > 密度(0.818 04)。说明氮肥和钾肥的施用是提高含糖锤度的关键,其次是磷肥,密度对含糖锤度的影响程度相对较小。

2.2.2 不同密度及 N、P、K 配比下不同节间含糖锤度分析

在不同密度及 N、P、K 配比处理条件下,辽甜 1 号在籽粒成熟期茎秆含糖锤度从上数第 4、7 和 10 节的变化规律应用雷达图可以看出(图 2),在不同处理下茎秆各节间的含糖锤度存在差异。密度、N、P、K 均在[-1~1]水平时,含糖锤度的分布趋势为上 7 节 > 上 10 节 > 上 4 节,密度、N、P、K 均在 0 水平时,这一趋势更加明显,4 因子均在-1 或其中一个因子码值为 2 时,其节间含糖锤度差异规律性较差。说明,在[-1~1]水平时,糖分分布更有规律性,表现为辽甜 1 号上 7 节 > 上 10 节 > 上 4 节。

4 因子均在 0 水平时,各节的含糖锤度均高于其他处理。第 7、10 和 4 节分别比其他处理高 11.10%、13.73% 和 8.57%,差异达显著水平(P < 0.05)。同时,各节间差异较小。说明在 0 水平时,各因子协调效果最佳,不但可提高单株平均含糖锤度,而且可减少各节间含糖锤度的差异,促进糖分在植株体内的平均分配。

表5 含糖锤度方差分析表

Table 5 Results of variance analysis on brix

变异来源	平方和	自由度	均方	偏相关	比值 F	P 值
X_1	7.161 3	1	7.161 3	-0.681 3	13.857 5	0.001 9
X_2	1.701 3	1	1.701 3	0.413 1	3.292 2	0.088 4
X_3	0.352 8	1	0.352 8	-0.202 3	0.682 8	0.420 8
X_4	0.010 8	1	0.010 8	-0.036 2	0.021 0	0.886 7
X_1^2	4.784 3	1	4.784 3	-0.605 4	9.257 8	0.007 8
X_2^2	8.347 3	1	8.347 3	-0.708 8	16.152 3	0.001 0
X_3^2	7.050 1	1	7.050 1	-0.678 4	13.642 3	0.002 0
X_4^2	4.784 3	1	4.784 3	-0.605 4	9.257 8	0.007 8
X_1X_2	0.051 8	1	0.051 8	-0.078 9	0.100 2	0.755 7
X_1X_3	0.005 3	1	0.005 3	0.025 2	0.010 2	0.920 9
X_1X_4	0.138 8	1	0.138 8	0.128 5	0.268 5	0.611 4
X_2X_3	0.596 8	1	0.596 8	0.259 4	1.154 8	0.298 5
X_2X_4	0.333 5	1	0.333 5	-0.196 9	0.645 4	0.433 6
X_3X_4	0.077 0	1	0.077 0	-0.096 1	0.149 0	0.704 6
回归	29.488 6	14	2.106 3	$F_2=4.075 8$		0.005 8
剩余	8.268 5	16	0.516 8			
失拟	6.740 0	10	0.674 0	$F_1=2.645 6$		0.040 2
误差	1.528 6	6	0.254 8			
总和	37.757 1	30				

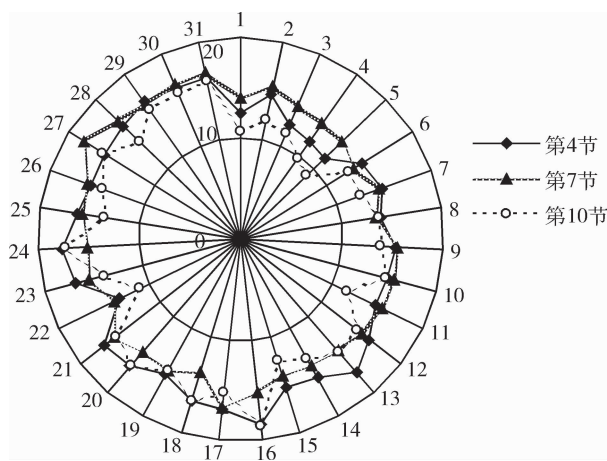


图2 31个处理不同节间含糖锤度的比较

Fig. 2 Comparison on brix in different node of 31 treatments

2.2.3 不同处理茎秆糖分积累分析

用 Logistic 方程 $Y=k/(1+e^{-bx})$ 对不同处理

下茎秆含糖锤度进行动态模拟见表6,各方程的相关系数均达到显著水平($R \geq 0.9000$),说明可用该方程进行模拟。

由方程得知,不同处理下茎秆糖分的平均积累速率、最大积累速率和最大积累速率出现的时间有所不同。在 N、P、K 均为 0 水平时,茎秆含糖锤度平均积累速率、最大积累速率和不同处理下最大积累速率出现的时间都明显高于其他水平,0 水平时的平均积累速率为 0.2617,比其他水平的平均积累速率(0.1848)高 41.61% ($P < 0.01$);最大积累速率为 0.3161,比其他水平的平均最大积累速率(0.2311)高 36.78% ($P < 0.01$);最大积累速率出现的时间也比其他处理平均高出 9.79% ($P < 0.01$)。但密度对群体的含糖锤度影响相对较小。说明不同处理下,以 N、P、K 均在 0 水平时的配比最佳,更有利于茎秆糖分的积累,可提高糖分的平均积累速率、延长糖分积累的时间,同时密度对茎秆含糖锤度影响相对较小。

表 6 不同生育时期糖分积累动态
Table 6 Sugar accumulation in different growing periods

编 码	回归方程	决定系数 (R^2)	平均积累速率 ACR/ (%/株·d)	最大积累速率 MCR/ (%/株·d)	最大积累速率 出现的天数/d
1	$Y=20.69/(1+e^{(1.040-0.041X)})$	0.909 2	0.152 3	0.189 0	28.61
2	$Y=22.65/(1+e^{(1.105-0.031X)})$	0.964 6	0.181 3	0.212 3	27.24
3	$Y=21.68/(1+e^{(0.987-0.034X)})$	0.943 5	0.141 3	0.187 3	28.58
4	$Y=24.26/(1+e^{(0.920-0.031X)})$	0.949 3	0.145 0	0.166 2	29.31
5	$Y=21.16/(1+e^{(0.920-0.031X)})$	0.942 8	0.135 0	0.191 7	29.13
6	$Y=19.44/(1+e^{(0.943-0.033X)})$	0.951 7	0.140 0	0.160 5	28.59
7	$Y=19.66/(1+e^{(1.019-0.041X)})$	0.946 4	0.163 8	0.203 2	24.67
8	$Y=20.87/(1+e^{(0.856-0.028X)})$	0.983 3	0.133 8	0.147 1	30.38
9	$Y=18.81/(1+e^{(1.727-0.066X)})$	0.960 2	0.232 5	0.312 0	26.03
10	$Y=21.15/(1+e^{(1.241-0.043X)})$	0.988 0	0.207 5	0.231 1	28.39
11	$Y=16.97/(1+e^{(1.221-0.050X)})$	0.975 3	0.173 8	0.215 3	24.08
12	$Y=21.85/(1+e^{(1.122-0.043X)})$	0.953 0	0.191 3	0.235 2	26.08
13	$Y=20.94/(1+e^{(1.170-0.051X)})$	0.951 1	0.203 8	0.264 9	23.13
14	$Y=19.20/(1+e^{(1.322-0.046X)})$	0.956 9	0.188 8	0.222 0	28.60
15	$Y=19.84/(1+e^{(1.056-0.038X)})$	0.955 7	0.161 3	0.193 2	27.13
16	$Y=20.50/(1+e^{(1.039-0.041X)})$	0.965 2	0.153 8	0.211 9	25.15
17	$Y=19.52/(1+e^{(2.240-0.082X)})$	0.977 5	0.296 3	0.404 3	27.04
18	$Y=20.39/(1+e^{(1.769-0.063X)})$	0.998 1	0.275 0	0.323 4	27.90
19	$Y=19.83/(1+e^{(1.993-0.074X)})$	0.971 3	0.277 5	0.371 4	26.61
20	$Y=20.40/(1+e^{(1.484-0.054X)})$	0.966 7	0.223 8	0.278 4	27.19
21	$Y=21.62/(1+e^{(1.450-0.049X)})$	0.949 0	0.213 8	0.267 1	29.34
22	$Y=17.68/(1+e^{(1.627-0.060X)})$	0.962 8	0.210 0	0.265 2	27.12
23	$Y=21.29/(1+e^{(1.228-0.044X)})$	0.943 4	0.191 3	0.237 2	27.56
24	$Y=18.33/(1+e^{(1.912-0.070X)})$	0.967 4	0.243 8	0.322 6	27.17
25	$Y=20.48/(1+e^{(1.840-0.061X)})$	0.965 1	0.248 8	0.313 6	30.05
26	$Y=22.05/(1+e^{(1.302-0.0451X)})$	0.987 0	0.218 8	0.248 7	28.86
27	$Y=23.54/(1+e^{(1.711-0.054X)})$	0.960 2	0.257 5	0.320 6	31.42
28	$Y=22.98/(1+e^{(1.615-0.052X)})$	0.957 8	0.243 8	0.300 4	30.89
29	$Y=21.66/(1+e^{(1.766-0.056X)})$	0.975 6	0.258 8	0.307 5	31.10
30	$Y=20.84/(1+e^{(1.728-0.059X)})$	0.994 3	0.268 8	0.312 0	28.85
31	$Y=22.46/(1+e^{(1.949-0.058X)})$	0.991 7	0.287 5	0.314 6	33.41

注：表中为辽甜 1 号甜高粱籽粒灌浆(8 月 15 日)后 10、20、30、40 和 50 d(籽粒成熟期)的糖分积累动态，Y 表示糖分积累，X 表示籽粒灌浆后的天数，最大积累速率出现的天数从籽粒灌浆(8 月 15 日)开始计算。

3 结论与讨论

3.1 密度、N、P、K 均在 0 水平时为高产最优方案

试验选取密度、N、P、K 4 个因子为研究对象,建立了以甜高粱辽甜 1 号产量为目标函数的数学模型,模拟程度较好。通过产量模型的解析得知:4 因子单因子效应对生物产量的影响程度: $N(X_2) > \text{密度}(X_1) > K(X_4) > P(X_3)$;因子互作效应中密度和磷肥、氮肥和磷肥互作效应较强,在码值 $[-1 \sim 1]$ 以内可以相互补充。表明充足的氮肥和合理的密度是取得高产的关键,但考虑因子间的相互作用,高氮肥、高密度水平下适当减少磷肥施用量更有利于生物产量潜力的发挥,这与郑庆福研究的结果略有差异,可能是因为高粱品种不同造成的^[13]。

对回归模型的寻优可得生物产量高于 95.86 t/hm² 的农艺措施为:密度为 67 545 ~ 80 905 株/hm²,平均 74 225 株/hm²;氮肥 137.40 ~ 162.60 kg/hm²,平均 150.00 kg/hm²;磷肥 94.02 ~ 117.74 kg/hm²,平均 105.88 kg/hm²;钾肥 52.87 ~ 67.15 kg/hm²,平均 60.01 kg/hm²。在本试验水平下,密度为 75 000 株/hm²,施 N 150 kg/hm²,施 P 138 kg/hm²,施 K 60 kg/hm² 时,可达最高产量 112.70 t/hm²。此方案为该生物产量回归模型的最优方案。

3.2 密度、N、P、K 均在 0 水平时含糖锤度可达较高水平

密度、N、P、K 与含糖锤度存在回归关系,可建立含糖锤度回归模型,拟合度较好。通过模型的解析得知:4 因子对含糖锤度的影响程度: $N(X_2) > K(X_4) > P(X_3) > \text{密度}(X_1)$,其中密度对含糖锤度影响程度较小。N、P、K 均在 0 水平时单株含糖锤度可达较高水平,不同节间糖分的分布表现为辽甜 1 号上 7 节 > 上 10 节 > 上 4 节。同时,对不同生育时期茎秆糖分积累的平均速率、平均最大积累速率以及最大积累速率出现的时间均在 0 水平时协调效果最佳,这与贾东海研究的结果基本一致^[14]。

3.3 进一步研究工作展望

本研究中,仅对辽甜 1 号一个甜高粱品种进行了研究与分析,对其氮、磷、钾及密度进行了数学模

型的建立和方程模拟,具有一定的局限性。此类氮、磷、钾及密度配比的数学模型和方程模拟是否适合其它甜高粱品种以及其他作物还有待于进一步研究。在甜高粱肥料配比方面,即要考虑当地实际的土壤条件,还要考虑不同作物及不同品种间对密度、氮、磷、钾和其他微量元素的需求,有针对性的进行肥料配比,做到充分、有效地利用肥料,达到增产、增效的目的。

参 考 文 献

- [1] Reddy B V S, Ramesh S, Reddy P S, et al. Sweet sorghum: a potential alternate raw material for bio-ethanol and bio-energy [J]. International Sorghum and Millets Newsletter, 2005(46): 79-86
- [2] 邹剑秋, 王艳秋, 张志鹏, 等. A₃ 型细胞质能源用甜高粱生物产量、茎秆含糖锤度和出汁率研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 8-13
- [3] 卢庆善. 甜高粱[M]. 中国农业科学技术出版社, 2008: 17-18
- [4] 孙清, 梁成华, 袁振宏, 等. 氮磷钾配施对甜高粱总糖和生物量的影响[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 252-255
- [5] 魏自民, 赵越, 周连仁. 不同施肥措施对风沙土区玉米产量影响数学模型的研究[J]. 玉米科学, 2003, 11(2): 75-77
- [6] 孙羲. 植物营养与肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 92-93
- [7] 张华文, 秦岭, 杨延兵, 等. 种植密度和品种对甜高粱生物性状与产量的影响[J]. 山东农业科学, 2008(7): 13-15
- [8] 王岩, 黄瑞冬. 种植密度对甜高粱生长发育、产量及含糖量的影响[J]. 作物杂志, 2008(3): 49-51
- [9] 于永静, 郭兴强, 谢光辉, 等. 不同行株距种植对甜高粱生物量和茎秆汁液锤度的影响[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 35-39
- [10] 郑庆福, 李凤山, 杨恒山, 等. 种植密度对杂交甜高粱甜格雷兹生长、品质及产量的影响[J]. 草原与草坪, 2005(4): 61-65
- [11] 朱美容, 刘厚宪, 石宗益, 等. 酿酒高粱氮、磷、钾肥平衡配施研究[J]. 耕作与栽培, 2004(3): 26-28
- [12] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 159-163
- [13] 郑庆福, 杨恒山, 刘晶, 等. N、P、K 肥配施对杂交甜高粱草产量及效益的影响[J]. 中国草地学报, 2007, 29(2): 65-69
- [14] 贾东海, 王兆木, 林萍, 等. 不同种植密度和施肥量对新高粱 3 号产量及含糖量的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(1): 47-53