

# 宁南旱地饲用高粱覆膜栽培农艺措施优化研究

杜建民, 王占军, 俞鸿千, 季波, 蒋齐\*

(宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002)

**摘要:** 采用4因素二次正交旋转组合设计, 研究旱地饲用高粱栽培关键因子密度、氮肥、磷肥、钾肥施用量对鲜草产量的影响。结果表明, 各因子对产量的影响效应为: 氮肥>磷肥>钾肥>密度, 且氮、磷、钾肥的影响效应均达显著水平; 密度与氮肥、磷肥和氮肥与磷肥之间交互效应达显著或极显著水平, 生产中低密度时应通过增加磷肥、氮肥用量以获取高产, 较高密度时要适当降低磷肥、氮肥用量以获取较高产量, 且在低磷水平下应适度控制氮肥用量, 而在高磷水平下通过增加氮肥用量可有效提升产量。运用计算机模拟寻优, 得出在旱地覆膜栽培条件下, 鲜草产量 $\geq 105\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 的优化栽培方案为: 密度12.80万~13.30万穴/ $\text{hm}^2$ , 氮肥217.26~240.30  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 磷肥183.28~200.60  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 钾肥114.36~149.10  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

**关键词:** 饲用高粱; 农艺措施; 密度; 施肥水平; 优化方案

中图分类号: S514

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)01-0054-06

## Optimized Cultivation of Film-Mulching Forage Sorghum in Dry Land of Southern Ningxia

DU Jianmin, WANG Zhanjun, YU Hongqian, JI Bo, JIANG Qi\*

(Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** Through experiment designed with the quadratic orthogonal rotation regression method of 4 factors such as density, N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{K}_2\text{O}$ . The results showed that: The effect of 4 factors influencing the yield of forage sorghum was  $\text{N} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{K}_2\text{O} > \text{density}$ , and the effect of N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{K}_2\text{O}$  was significant. Density and interaction effect between N and  $\text{P}_2\text{O}_5$  reached significant or extremely significant level, the production of low density should be adding by  $\text{P}_2\text{O}_5$  and N in order to get high yield. When density is high, the amount of N and  $\text{P}_2\text{O}_5$  should be reduced appropriately to get higher yield, and the amount of N should be controlled appropriately under lower  $\text{P}_2\text{O}_5$  level. Under high  $\text{P}_2\text{O}_5$  levels, the yield could be effectively increased by increasing N level. Through computer simulation, the optimal cultivation scheme of fresh grass yield  $\geq 105\ 000\ \text{kg}/\text{ha}$  under the condition of film-mulching in dry land is as follows: Density 128, 000–133, 000 holes/ha, N 217.26–240.30  $\text{kg}/\text{ha}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  183.28–200.60  $\text{kg}/\text{ha}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  114.36–149.10  $\text{kg}/\text{ha}$ .

**Key words:** Forage sorghum; Agronomic measures; Density; Fertilization level; Optimization scheme

随着草食畜牧业的快速发展, 家畜养殖对饲草料的需求日益增长, 扩大人工饲草种植面积、增加优质饲草供给显得尤为迫切<sup>[1]</sup>。饲用高粱因其较强的抗旱、耐涝、耐瘠薄、耐低温能力, 营养丰富<sup>[2-3]</sup>, 生物产量显著高于玉米等其他饲料作物, 在宁夏南部山区肉牛养殖地区已具有一定的种植规模。

目前, 关于饲用高粱不同农艺措施对产量的

影响已进行部分研究, 认为种植密度、施肥量是影响产量最重要的栽培因子<sup>[4-6]</sup>, 但大多研究局限于单因素试验, 缺乏因子间交互作用及综合农艺措施对产量影响的研究, 为了解不同种植密度下氮、磷、钾肥合理施用, 充分发挥各因子协同作用提高饲草产量以指导生产实践, 本研究以不同肥料施用量和密度对饲草产量的影响为研究对象, 对各因子间的交互作用进行探讨, 优化饲用高粱栽培农艺措施, 以期在当地饲用高粱覆膜栽培提供借鉴。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于宁南山区泾源县六盘山镇蒿店村

收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2017BY082); 国家牧草产业技术体系盐池综合试验站(CARS-34)

作者简介: 杜建民(1977-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事节水农业和人工草地栽培方面的研究工作。

通讯作者: 蒋齐, 男, 硕士, 研究员, E-mail: yeiqnx@163.com

军盛草畜专业合作社,东经106°14'21",北纬35°36'33",海拔2186~2435 m,为六盘山东麓黄土丘陵沟壑区。属中温带半湿润气候,年均气温5.7℃,年日照时数2236 h,≥10℃有效积温2100℃·d,年均蒸发量810 mm,年均降水量641.5 mm,无霜期132 d<sup>[7]</sup>。土壤类型为黄绵土,土质疏松,有机质含量7.8%、速效氮47.8 mg/kg、速效磷13.5 mg/kg、速效钾116.0 mg/kg、pH 8.1,无灌溉条件。

## 1.2 试验设计

试验于2019年进行,采用4因子5水平二次正交旋转组合设计,各因子编码水平见表1。共36个处理,3次重复,完全随机排列。试验地前茬为燕麦,于春季耕整后划定试验小区,面积4.6 m×8 m=36.8 m<sup>2</sup>,将肥料按小区撒施后人工起垄全膜双垄沟覆盖,选用白色地膜厚度0.012 mm、幅宽1.2 m。于4月20日播种,供试饲用高粱品种为

F10,种植行距40 cm,每穴播种子2~3粒,播深3~4 cm,各处理根据密度不同调控穴距。试验用氮肥为普通尿素(N 46%)、磷肥为磷酸二铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%,N 18%)和磷酸二氢钾、钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>O 40%),均做基肥于覆膜前撒施。其他生产管理同常规。

## 1.3 产量测定

于饲用高粱灌浆初期采用对角线法在各小区内顺行取3行×1 m长样方进行测产,重复3次,以平均值作为各处理鲜草产量。

## 1.4 数据处理

利用SPSS 17.0和Microsoft Excel 2007进行试验数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的建立与检验

依据表2各处理饲用高粱测产结果,以鲜草产量为目标值对各供试因子进行多元回归拟合,结果见表3,得如下方程:

$$Y=87469.01+849.17x_1+9067.92x_2+6942.08x_3+2474.17x_4-1990x_1x_2-3166.25x_1x_3-355x_1x_4+2546.88x_2x_3+654.38x_2x_4+698.13x_3x_4-293.84x_1^2-2993.84x_2^2-2067.59x_3^2-2361.97x_4^2 \dots (1)$$

对方程(1)的拟合情况和显著性进行检验,结

表1 因子编码水平设计

试验因子	变化 间距	因素设计水平(r=2)				
		-2	-1	0	1	2
密度(x <sub>1</sub> )(万穴/hm <sup>2</sup> )	1.1	12.4	13.5	14.6	15.7	16.8
N(x <sub>2</sub> )(kg/hm <sup>2</sup> )	60.0	0	75.0	135.0	195.0	255.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (x <sub>3</sub> )(kg/hm <sup>2</sup> )	52.5	0	52.5	105.0	157.5	210.0
K <sub>2</sub> O(x <sub>4</sub> )(kg/hm <sup>2</sup> )	45.0	0	60.0	105.0	150.0	195.0

表2 试验结构矩阵及产量结果

处理	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	鲜草产量(kg/hm <sup>2</sup> )	处理	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	鲜草产量(kg/hm <sup>2</sup> )
1	1	1	1	1	1	108 810	19	1	0	2	0	0	109 920
2	1	1	1	1	-1	102 270	20	1	0	-2	0	0	69 780
3	1	1	1	-1	1	93 660	21	1	0	0	2	0	106 230
4	1	1	1	-1	-1	84 615	22	1	0	0	-2	0	80 880
5	1	1	-1	1	1	86 430	23	1	0	0	0	2	96 795
6	1	1	-1	1	-1	85 305	24	1	0	0	0	-2	87 960
7	1	1	-1	-1	1	83 085	25	1	0	0	0	0	98 505
8	1	1	-1	-1	-1	81 780	26	1	0	0	0	0	96 705
9	1	-1	1	1	1	113 470	27	1	0	0	0	0	97 215
10	1	-1	1	1	-1	110 435	28	1	0	0	0	0	99 780
11	1	-1	1	-1	1	92 925	29	1	0	0	0	0	101 265
12	1	-1	1	-1	-1	85 455	30	1	0	0	0	0	104 760
13	1	-1	-1	1	1	94 970	31	1	0	0	0	0	103 230
14	1	-1	-1	1	-1	82 755	32	1	0	0	0	0	99 465
15	1	-1	-1	-1	1	70 470	33	1	0	0	0	0	102 705
16	1	-1	-1	-1	-1	69 495	34	1	0	0	0	0	94 650
17	1	2	0	0	0	104 250	35	1	0	0	0	0	96 300
18	1	-2	0	0	0	97 050	36	1	0	0	0	0	95 730

表3 数学模型回归系数矩阵及其显著性检验结果

项目	一次项					交互项					二次项				
	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>14</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>24</sub>	b <sub>34</sub>	b <sub>11</sub>	b <sub>22</sub>	b <sub>33</sub>	b <sub>44</sub>
回归系数	87469.01	849.17	9067.92	6942.08	2474.17	-1990.00	-3166.25	-355.00	2546.00	654.38	698.13	-293.84	-2993.84	-2067.59	-2361.97
t值	149.960	1.104	11.794**	9.029**	3.218**	2.113*	3.362**	0.377	2.705*	0.694	0.741	0.441	4.496**	3.105**	3.547**
SS <sub>总</sub>	4541358858			SS <sub>回</sub>	4243413640			SS <sub>离</sub>	297945217.1			SS <sub>误</sub>	115911375		
df <sub>总</sub>	35			df <sub>回</sub>	14			df <sub>离</sub>	21			df <sub>误</sub>	11		
方程检验	$F_1=(SS_{离}/df_{离})/(SS_{误}/df_{误})=1.728 < F_{0.05(10,11)}$ , $F_2=(SS_{回}/df_{回})/(SS_{离}/df_{离})=21.363 > F_{0.01(14,21)}$														

注:  $t_{0.01,21}=2.831$ ,  $t_{0.05,21}=2.080$ ,  $F_{0.05(10,11)}=2.85$ ,  $F_{0.01(14,21)}=2.20$

果表明  $F_1=1.728 < F_{0.05(10,11)}$ , 回归方程无失拟因素存在, 与实际情况拟合较好, 且  $F_2=21.363 > F_{0.01(14,21)}$ , 试验所设4项农艺措施与目标性状间存在明显函数关系, 可直接进行模拟仿真预测。

## 2.2 模型的解析选优

### 2.2.1 单因子效应分析

由方程(1)和表3可知, 试验各因子对产量影响的大小顺序为:  $x_2 > x_3 > x_4 > x_1$ , 表明施氮量对产量的影响最大, 其次为磷肥, 且氮、磷、钾肥对产量的影响均达显著水平; 密度对产量的影响不显著, 其在产量的形成中不起主要作用; 二次项的排列顺序为:  $x_2^2 > x_4^2 > x_3^2 > x_1^2$ , 且均为负效应。

### 2.2.2 各因子边际效应分析

对方程(1)进行降维处理并求一阶导数, 获得各供试因子的边际效应方程:

$$dy/dx_1 = 849.17 - 587.68x_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$dy/dx_2 = 9067.92 - 5987.6x_2 \dots\dots\dots (3)$$

$$dy/dx_3 = 6942.08 - 4135.18x_3 \dots\dots\dots (4)$$

$$dy/dx_4 = 2474.17 - 4723.94x_4 \dots\dots\dots (5)$$

由表4和图1可知,  $x_1$ 在-2~1.44区间具有增产效应, 但随  $x_1$  编码值的增加增产效应逐步下降; 在  $x_1=1.44$ 时, 边际产量为0, 即密度为14万穴/hm<sup>2</sup>时, 密度对产量增加的贡献率为0;  $x_1$ 在1.44~2区间时,  $x_1$ 对产量增加具有负效应, 随密度的增加产量逐步下降。 $x_2$ 在-2~0.52区间具有增产效应, 随  $x_2$  水平的增加增产效应逐步下降, 在  $x_2=-2$ 时, 每

表4 各因子的边际产量

因子	水平				
	-2	-1	0	1	2
播量( $x_1$ )	2024.53	1436.85	849.17	261.49	-326.19
N( $x_2$ )	21 043.28	15 055.6	9067.92	3080.24	-2907.44
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( $x_3$ )	15 212.44	11 077.26	6942.08	2806.9	-1328.28
K <sub>2</sub> O( $x_4$ )	11 922.05	7198.11	2474.17	-2249.77	-6973.71

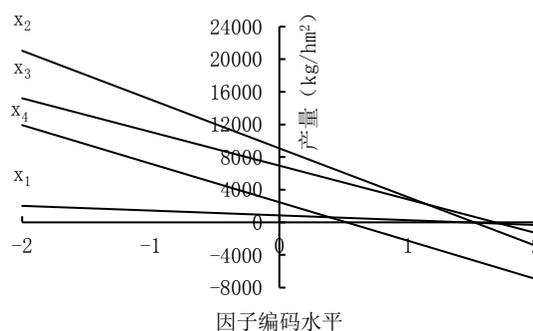


图1 各因子的边际产量效应

增施1 kg/hm<sup>2</sup>钾肥, 产量增加158.96 kg/hm<sup>2</sup>; 在  $x_4=0.52$ 时, 边际产量为0;  $x_2$ 在0.52~2区间时对产量的增加为负效应, 随施钾肥量的增加产量逐步下降。 $x_3$ 在-2~1.69区间具有增产效应, 随  $x_3$  水平的增加增产效应逐步下降, 在  $x_3=-2$ 时, 每增施1 kg/hm<sup>2</sup>磷肥, 产量增加253.54 kg/hm<sup>2</sup>; 在  $x_3=1.69$ 时, 边际产量为0, 单施磷肥对产量贡献率达到饱和;  $x_3$ 在1.69~2区间时对产量的增加为负效应, 随施磷量的增加产量逐步下降。 $x_2$ 在-2~1.51区间具有增产效应, 随  $x_2$  水平的增加增产效应逐步下降, 在  $x_2=-2$ 时, 每增施1 kg/hm<sup>2</sup>氮肥, 产量增加187.05 kg/hm<sup>2</sup>; 在  $x_2=1.51$ 时, 边际产量为0;  $x_2$ 在1.51~2区间时对产量的增加为负效应, 随施氮量的增加产量逐步下降。

由图1知,  $x_2$ 和  $x_3$ 直线在因子编码值为1.15时相交, 表明  $x_2$ 和  $x_3$ 在交点处的增产效应相同, 在编码值小于1.15时  $x_2$ 的增产效应大于  $x_3$ , 即氮肥施用量小于129.38 kg/hm<sup>2</sup>时, 且磷肥施用量小于69 kg/hm<sup>2</sup>时, 增施1 kg/hm<sup>2</sup>磷肥增产效应低于增施1.875 kg/hm<sup>2</sup>氮肥; 在编码值为1.15~1.69区间时  $x_3$ 的增产效应大于  $x_2$ , 即氮肥施用量在129.38~190.13 kg/hm<sup>2</sup>时, 且磷肥施用量在69~101.4 kg/hm<sup>2</sup>时, 增施1 kg/hm<sup>2</sup>磷肥增产效应高于增施1.875 kg/hm<sup>2</sup>氮肥。

2.2.3 因子交互效应分析

由表3回归模型交互项回归系数的t检验可知,  $x_1x_3$ 对产量影响达极显著水平,  $x_1x_2$ 和  $x_2x_3$ 达显著水平。对方程(1)进行降维,得出以下回归方程:

$Y_{13}=87469.01+849.17x_1+6942.08x_3-3166.25x_1x_3-293.84x_1^2-2067.59x_3^2$  (6)

$Y_{12}=87469.01+849.17x_1+9067.92x_2-1990x_1x_2-$

$293.84x_1^2-2993.84x_2^2$  (7)

$Y_{23}=87469.01+9067.92x_2+6942.08x_3+2546.88x_2x_3-2993.84x_2^2-2067.59x_3^2$  (8)

由方程(6)计算出  $x_1$ 和  $x_3$ 不同水平时饲用高粱产量并列于表5,  $x_1$ 在-2~0区间时,随着  $x_3$ 编码值的增加产量逐渐增加,产量的最高值均出现在  $x_3=2$ 时,表明低密度时通过增加磷肥施用量以获取高产;而  $x_1$ 在1~2区间时,随着  $x_3$ 编码值的增加

表5  $x_1$ 与  $x_3$ 交互对应的产量

Table with 6 columns: 产量(kg/hm²), x3 (-2, -1, 0, 1, 2), and x1 (-2, -1, 0, 1, 2). It shows the interaction between x1 and x3 on yield.

产量呈现先增加后下降的趋势,且最高值出现在  $x_3=1$ 和  $x_3=0$ 时,表明在较高密度时适当降低磷肥用量以获取较高产量。

由方程(7)计算出  $x_1$ 和  $x_2$ 不同水平时的饲用高粱产量并列于表6,结合图2可知,  $x_1$ 在-2~0区间时,随着  $x_2$ 编码值的增加,饲用高粱产量逐步增加,在中低密度水平下,随施氮量的增加产量逐步增加,播量与施氮量呈正交互效应;  $x_1$ 在1~2区间时,随着  $x_2$ 编码值的增加,饲用高粱产量呈现先增加后下降的过程,且最高值均出现在  $x_2=1$ 时,表明在高密度水平下,应适度控制氮肥用量。同

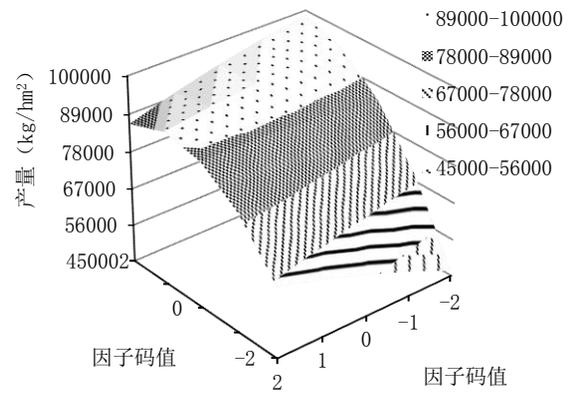


图2  $x_1 \times x_2$ 对产量的交互作用

表6  $x_1$ 与  $x_2$ 交互对应的产量

kg/hm²

Table with 6 columns: 产量, x2 (-2, -1, 0, 1, 2), and x1 (-2, -1, 0, 1, 2). It shows the interaction between x1 and x2 on yield.

表7  $x_2$ 与  $x_3$ 交互对应的产量

kg/hm²

Table with 6 columns: 产量, x3 (-2, -1, 0, 1, 2), and x2 (-2, -1, 0, 1, 2). It shows the interaction between x2 and x3 on yield.

时,  $x_2$  在  $-2 \sim -1$  区间时, 随着  $x_1$  编码值的增加, 饲用高粱产量逐步增加, 而  $x_2$  在  $1 \sim 2$  区间时, 随着  $x_1$  编码值的增加, 饲用高粱产量逐步下降, 表明在低氮水平下应通过适度增加植株密度提升产量, 而在高氮水平下, 要控制播量以降低田间植株密度来实现高产。

由方程(8)计算出  $x_2$  和  $x_3$  不同水平时的饲用高粱产量并列于表7, 结合图3可知,  $x_2$  在  $-2 \sim -1$  区间时, 随着  $x_3$  编码值的增加, 饲用高粱产量呈现先增加后下降的趋势, 且最高值分别出现在  $x_3=0$  和  $x_3=1$  时, 表明在低施氮水平下要适度控制磷肥用量;  $x_2$  在  $0 \sim 2$  区间时, 随着  $x_3$  编码值的增加, 饲用高粱产量逐步增加, 且最高值均出现在  $x_3=2$  时, 在中高施氮水平下, 随施磷量的增加产量逐步增加, 施氮与施磷量呈正交互效应。同时,  $x_3$  在  $-2 \sim -1$  区间时, 随着  $x_2$  编码值的增加, 饲用高粱产量呈现先增加后降低的趋势, 产量最高值均为  $x_2=1$  时, 而  $x_3$  在  $0 \sim 2$  区间时, 随着  $x_2$  编码值的增加饲用高粱产量逐步增加, 表明在低磷水平下应适度控制氮肥

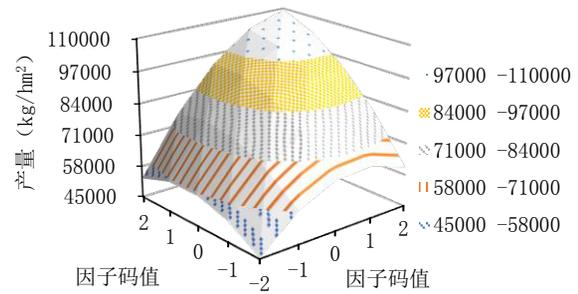


图3  $x_2 \times x_3$  对产量的交互作用

用量, 而在高磷水平下, 通过增加氮肥用量可有效提升产量。

#### 2.2.4 数学模拟与综合选优

在满足  $-2 \leq x_i \leq 2$  约束条件下, 取因子步长为1, 对所建立的目标函数进行模拟, 得到95% 概率水平保证下, 鲜草产量  $\geq 105\,000$  kg/hm<sup>2</sup> 的优化栽培措施综合方案32套, 如表8所示: 密度12.80万~13.30万穴/hm<sup>2</sup>, 氮肥217.26~240.3 kg/hm<sup>2</sup>, 磷肥183.28~200.60 kg/hm<sup>2</sup>, 钾肥114.36~149.10 kg/hm<sup>2</sup>。

表8 优化方案主因子分布频率

编码值	播量		氮肥(N)		磷肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		钾肥(K <sub>2</sub> O)		
	次数	%	次数	%	次数	%	次数	%	
自变量水平	-2	17	53.12	0	0	0	0	1	3.13
	-1	11	34.38	0	0	0	0	4	12.5
	0	4	12.5	1	3.13	0	0	8	25
	1	0	0	12	37.50	11	34.38	11	34.38
	2	0	0	19	59.37	21	65.62	8	25.00
合计	32	100	32	100	32	100	32	100	
加权均值	-1.406		1.563		1.656		0.594		
标准误	0.124		0.098		0.084		0.197		
95% 置信区间	-1.649~-1.163		1.371~1.755		1.491~1.821		0.208~0.980		
农艺措施	12.80~13.30 (万穴/hm <sup>2</sup> )		217.26~240.30(kg/hm <sup>2</sup> )		183.28~200.60(kg/hm <sup>2</sup> )		114.36~149.10(kg/hm <sup>2</sup> )		

### 3 讨论

饲用高粱因其收获器官的不同, 其产量的形成受品种特性、气候条件、栽培措施等因素的影响, 但种植密度、施肥量是影响产量最重要的因素<sup>[5]</sup>, 合理的施肥量和种植密度不仅可以获得高产, 同时可以减少肥料的过度使用而造成的环境污染和过多的经济投入<sup>[4]</sup>。本研究表明, 在供试各栽培因子中, 氮肥用量对生物产量的影响最大<sup>[8-10]</sup>, 其次为磷肥, 第三是钾肥<sup>[11]</sup>, 氮、磷、钾肥对产量的影响均达显著水平, 与王秉龙等<sup>[12]</sup>、周怀平等<sup>[13]</sup>、苏富源等<sup>[14]</sup>的研究结论相同, 但郭彦军等<sup>[15]</sup>

认为重庆地区饲用高粱对氮肥和钾肥敏感, 笔者认为是由试验地土壤速效钾养分含量差异造成的; 氮、磷、钾肥均存在施用量达到一定程度后, 随施肥量的增加产量呈逐步下降趋势, 这与郑庆福等<sup>[16]</sup>、卢庆善等<sup>[17]</sup>、吕艳东等<sup>[18]</sup>、王成等<sup>[19]</sup>、王洪预等<sup>[20]</sup>的研究结论相一致。同时, 在本试验条件下, 随着种植密度的增加, 饲草产量逐步增加, 在密度达到14万穴/hm<sup>2</sup>时边际产量为0, 之后随密度的增加产量呈下降趋势<sup>[21-22]</sup>, 这与刘翔宇等<sup>[23]</sup>认为边际产量为0对应的密度是11.91万穴/hm<sup>2</sup>略有差异, 但对种植密度与生物产量间的变化趋势的结论相一致。

在各因子的交互效应方面,本研究认为密度与氮肥、磷肥之间交互效应达显著或极显著水平,低密度时通过增加磷肥、氮肥用量以获取高产,较高密度时适当降低磷肥、氮肥用量以获取较高产量,这与申晓慧等<sup>[6]</sup>的研究结论相一致;而氮、磷、钾肥之间的交互效应虽均为正效应<sup>[24]</sup>,但仅氮、磷间达显著水平,且在低磷水平下应适度控制氮肥用量,而在高磷水平下通过增加氮肥用量可有效提升产量。

本研究通过对所建立的目标函数进行模拟寻优,结果与王劲松等<sup>[25]</sup>认为高粱最佳种植密度10.5万~13.5万穴/hm<sup>2</sup>、王洪预等<sup>[20]</sup>认为粒用高粱最佳施肥量和王艳秋等<sup>[21]</sup>利用二次回归通用旋转组合设计模拟预测的最优施肥方案具有一定的差异,笔者认为主要由各研究供试品种、试验区环境条件、生产管理措施、收获时期及利用方式的不同造成的。

## 4 结 论

(1)饲用高粱在旱地覆膜种植条件下,各试验因子对产量影响的顺序为:氮肥>磷肥>钾肥>密度,且氮、磷、钾肥对产量的影响均达显著水平;密度与氮肥、磷肥和氮肥与磷肥之间交互效应达显著或极显著水平,生产中低密度时应通过增加磷肥、氮肥用量以获取高产,较高密度时要适当降低磷肥、氮肥用量以获取较高产量,且在低磷水平下应适度控制氮肥用量,而在高磷水平下通过增加氮肥用量可有效提升产量。

(2)运用计算机模拟寻优,得出在旱地覆膜栽培条件下,鲜草产量 $\geq 105\ 000$  kg/hm<sup>2</sup>的优化栽培方案为:密度12.80~13.30万穴/hm<sup>2</sup>,氮肥217.26~240.3 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥183.28~200.60 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥114.36~149.10 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参考文献:

- [ 1 ] 于 洋,何志军,侯鹏霞,等.宁夏宁南山区高产饲草品种引种筛选[J].现代畜牧兽医,2018(9):32-35.
- [ 2 ] 闫鸿雁,付立中,胡国宏,等.国内外甜高粱研究现状及应用前景分析[J].吉林农业科学,2006,31(5):63-65.
- [ 3 ] 张一中,周福平,张晓娟,等.播种期对晋北地区高粱生长发育及产量的影响[J].作物杂志,2015(5):96-99.
- [ 4 ] 曹 雄,梁晓红,黄敏佳,等.不同栽培措施对高粱产量的影响[J].中国农学通报,2018,31(3):126-132.
- [ 5 ] 李 英,张兴启.不同栽培措施对高粱产量的影响[J].农业与技术,2010,35(19):26-27.
- [ 6 ] 申晓慧,姜 成,冯 鹏,等.不同栽培因子对‘绥杂7号’产量的影响[J].农学学报,2015,5(11):4-9.
- [ 7 ] 周 楠,杨文海,康 睿,等.泾源草畜产业气象服务的思考[J].甘肃畜牧兽医,2018,48(7):21-22.
- [ 8 ] Khaled M, Ranaz D S. Productivity, nutrient uptake and profitability of sweet sorghum-mustard cropping system under different levels of nitrogen[J]. American Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 2(2): 62-73.
- [ 9 ] Uchino H, Watanabe T, Ramu K, et al. Dynamics of fertilizer nitrogen applied to sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in the Semi-Arid tropics [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2015, 49(4): 409-418.
- [ 10 ] Almodares A, Taheri R, Hadi M R, et al. The effect of nitrogen and potassium fertilizers on the growth parameters and the yield components of two sweet sorghum cultivars[J]. Pakistan Journal of Biological Science, 2006, 9(12): 2350-2352.
- [ 11 ] 王志春,王永慧,陈建平,等.氮磷钾肥配施对盐碱地甜高粱产量及干物质积累的影响[J].江苏农业科学,2013,41(11):80-81.
- [ 12 ] 王秉龙,罗世武,炎宽将,等.氮磷钾配施水平对饲用甜高粱产量的影响[J].甘肃农业科技,2010(12):12-14.
- [ 13 ] 周怀平,郝保平,关春林,等.施肥对饲草高粱生长及营养品质的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(1):60-63.
- [ 14 ] 苏富源,郝明德,张晓娟,等.施肥对甜高粱产量、养分吸收及品质的影响[J].西北农业学报,2016,25(3):396-405.
- [ 15 ] 郭彦军,尹亚丽,张 健,等.施肥对甜高粱产量及茎叶养分质量分数的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2011,33(10):21-26.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 卢庆善.甜高粱[M].北京:中国农业科学技术出版社,2008:17-18.
- [ 18 ] 吕艳东,牛志伟,李红宇,等.施肥量对饲用杂交甜高粱生长发育及产量的影响[J].黑龙江八一农垦大学学报,2006,18(3):17-20.
- [ 19 ] 王 成,王劲松,丁玉川,等.不同高粱基因型对氮磷钾缺乏的生物学响应[J].山西农业科学,2015,43(9):1133-1137.
- [ 20 ] 王洪预,崔正果,伍舒悦,等.氮磷钾肥料配施对粒用高粱籽粒产量的影响[J].东北农业科学,2018,43(3):1-4.
- [ 21 ] 王艳秋,邹剑秋,张志鹏,等.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[J].中国农业大学学报,2012,17(6):103-110.
- [ 22 ] 詹鹏杰,平俊爱,楚建强,等.不同种植环境和密度对机械化栽培高粱农艺性状及产量的影响[J].山西农业科学,2019,47(10):1783-1788,1814.
- [ 23 ] 刘翔宇,刘祖昕,董世磊,等.新疆草甸盐土新高粱2号关键栽培技术研究[J].作物杂志,2014(6):127-130.
- [ 24 ] 韦 伟,陈思哲,王仕玥,等.肥料效应函数在酒用高粱施肥技术中的应用[J].山地农业生物学报,2010,29(3):209-214.
- [ 25 ] 王劲松,董二伟,焦晓燕,等.不同种植模式对高粱晋糯3号产量和养分吸收的影响[J].作物杂志,2019(5):166-172.

(责任编辑:王 昱)