

肥密组合对寒地半干旱区膜下滴灌玉米产量的影响

张发明, 杨克军, 李佐同, 赵长江, 王玉凤, 徐晶宇, 张翼飞, 王智慧, 付健,
谷英楠, 杨系玲, 刘慧迪, 刘承, 刘瑀, 方永江, 唐春双, 王聪

(寒地作物种质改良与栽培重点实验室/黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 为揭示黑龙江西部半干旱区膜下滴灌栽培方式下玉米高产措施, 以郑单 958 为材料, 选取氮肥、磷肥、钾肥和密度四因素作为试验因素, 每个试验因素设计 5 个水平, 按照二次通用旋转组合设计(1/2 实施)统计分析方法建立回归模型, 分析不同肥料和密度组合对玉米产量的影响。结果表明: 四因素各单因子对籽粒产量有较明显的影响, 均呈开口向下的抛物线趋势变化, 影响顺序为施氮 > 密度 > 施钾 > 施磷, 且单位水平施入量引起边际产量的减少量为施磷 > 密度 > 施钾 > 施氮; 氮肥与磷肥之间的配合对产量的增加具有相互促进作用; 要获得 $\geq 12231.97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的产量, 氮肥、磷肥、钾肥及种植密度的最优组合取值范围为: 氮肥 $246.24 \sim 279.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷肥 $133.77 \sim 151.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 钾肥 $82.85 \sim 97.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 种植密度 $79\ 676 \sim 85\ 324 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 玉米; 膜下滴灌; 施肥种类; 种植密度; 产量; 寒地半干旱区

中图分类号: S513 文献标志码: A

Effects of density and fertilization combination on yield of maize under mulched drip irrigation in semi-arid and cold areas

ZHANG Fa-ming, YANG Ke-jun, LI Zuo-tong, ZHAO Chang-jiang, WANG Yu-feng, XU Jing-yu,
ZHANG Yi-fei, WANG Zhi-hui, FU Jian, GU Ying-nan, YANG Xi-ling, LIU Hui-di, LIU Cheng, LIU Yu,
FANG Yong-jiang, TANG Chun-shuang, WANG Cong

(Key Laboratory of Crop Germplasm improvement and cultivation in Cold Area/College of Agronomy,
Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: To investigate the cultivation practices for high yield of maize under mulched drip irrigation in the semi-arid and cold areas in western Heilongjiang province, maize variety Zhengdan 958 was used as the study material. In addition, nitrogen, phosphate, potash and planting density were selected as the four experimental factors, each of which was tested at five levels. A quadratic regression model was thereby employed to establish in accordance with rotation design statistical analysis methods (1/2 implement) to analyze the effects of different fertilizers and planting densities on grain yield. The results showed that each single factor had obvious influence on grain yield, exhibiting a trend of downward opening parabola. The effects of these four factors were in an order of nitrogen (N) > density > potash (K) > phosphate (P). Also, the marginal yield reduction caused by unit volume level applied was in a order of phosphate (P) > density > potash (K) > nitrogen (N). Coordination between nitrogen and phosphate had a mutual promoting effect on the increase of grain yield. To achieve a yield higher than $12231.97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the best combination of nitrogen and phosphate fertilizer, potash fertilizer, and planting density were as follows: $246.24 \sim 279.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen; $133.77 \sim 151.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ phosphate; $82.85 \sim 97.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ potash and $79\ 676 \sim 85\ 324 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ planting density.

Keywords: maize; semi-arid and cold areas; mulched drip irrigation; fertilizer and density; yield

中国是世界第二大玉米生产国,产量约占全球玉米产量的 1/5 左右。玉米是中国种植面积最大的粮食作物,作为东北的第一大作物,占总播种面积的

42.9%。目前,黑龙江省的玉米播种面积、总产量和商品化率均跃居全国第一,成为全国玉米第一大省,因其得天独厚的自然条件而被世界公认为“黄金玉

收稿日期: 2015-02-18

基金项目: 粮食丰产科技工程(2011BAD16B11-03); 国家科技计划课题(2013BAD07B01-07); 黑龙江省农垦总局科技攻关项目(HNK11A-03-02); 大庆市科技计划项目(SJH-2013-35)

作者简介: 张发明(1988—),男,黑龙江延寿人,在读硕士,研究方向为玉米高产理论与技术。E-mail: 15164568108@126.com。

通信作者: 杨克军(1968—),男,山东莒县人,博士,教授,主要从事作物高产栽培与耕作方面的研究。E-mail: byndykj@163.com。

米带”^[1-4]。然而,干旱缺水、土壤肥力低下是限制黑龙江省西部半干旱地区玉米产量提高的两个主要因素^[5]。作物高产的形成囿于多方面的因素,提高种植密度是玉米高产的重要措施之一^[6]。密植必然导致作物对矿质养分需求的增加,而肥料投入运筹也是实现高产和提高效益最有效的方法之一^[7]。膜下滴灌技术具有提高土壤耕层温度,并使作物近根区保持适宜湿度和养分浓度,同时具有节水、节肥等优点^[8]。在国外,膜下滴灌多应用于有较高经济价值园艺作物。美国水管理研究所对番茄、棉花和甜玉米等作物15年地下滴灌的研究结果表明,利用高频度的滴灌可以减少深层渗漏量和提高水分利用率,并显著提高作物产量^[9]。滴灌番茄的产量和水分利用率均比沟灌高,株高和果实饱满度也有相同的趋势^[10]。前人的研究多见于膜下滴灌条件下,水肥耦合对作物产量效应^[11-15]及水肥施用最优配比研究,而对肥密这两个因子交互作用增产效应的研究相对较少。因此,本试验采用二次通用旋转组合设计和膜下滴灌的方法,研究不同肥密组合对玉米产量的影响,在建立该类型地区玉米产量数学模型的基础上,寻求高产高效优化方案,以期对玉米节水节肥高产高效栽培和产业发展提供理论和实践的指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及品种

试验于2014年5月至10月在黑龙江八一农垦大学农学院试验基地(46°62'N, 125°19'E)进行,平均海拔146 m,该区属于典型的北温带亚干旱季风气候区,全年降水较少,平均气温在5℃左右,年平均无霜期在143 d左右,2014年试验区气象数据如表1所示。供试土壤为草甸土。试验田0~20 cm耕作层有机质含量26.62 g·kg⁻¹,碱解氮130.42 mg·kg⁻¹,速效磷55.99 mg·kg⁻¹,速效钾31.37 mg·kg⁻¹,pH值8.13,试验田地力均匀,地势平坦,田间持水量为28.5%。试验选用当地高产且主栽玉米杂交种郑单958。

表1 2014年试验区气象数据

Table 1 Meteorological data of experimental area in 2014

月份 Month	平均气温/℃ Average temperature	日照时数/h Sunshine hours	降水量/mm Precipitation
五月 May	14.6	152.0	69.7
六月 June	23.3	218.8	104.6
七月 July	23.3	147.2	59.6
八月 August	22.0	221.8	60.4
九月 September	15.6	222.5	60.5

1.2 试验设计

试验采用4因子5水平(1/2实施)二次通用旋转组合设计,选取氮肥、磷肥和钾肥、密度4种处理作为试验因素,各因素设计了5个不同水平。田间实施采用裂区设计,密度为主区,施肥量为副区。种植方式为大垄双行膜下滴灌,垄距为110 cm,垄上植株行距为50 cm,两垄间相邻植株行距为60 cm,边起垄边覆膜,膜与膜之间不留空隙,相接处用土压住地膜,每小区配备一块水表,以保证小区单独灌水及施肥的要求,灌水量由水表计量。小区15 m行长,6行区,共20个试验小区,施肥量和种植密度详见表2。磷肥及钾肥以种肥形式一次施入,-1.682、-1、0水平氮肥以1/3量施种肥,1、1.682水平以1/4量施种肥,其余在拔节期追肥。氮肥用尿素做种肥,并用尿素做追肥;磷肥用磷酸二铵;钾肥用硫酸钾,按纯量折算,其中纯氮含量为尿素(N≥46.4%)和磷酸二铵(N≥18%)中纯氮总和。追肥尿素在第2次灌水(拔节期)时随滴灌带流入田间。根据玉米不同生长期土壤相对水分含量需求来判断是否补充灌溉。补灌水量通过下式计算: $M = C \times H \times A \times (W_2 - W_1)$ 。其中: M 为灌水量(t); C 为土壤容重(t·m⁻³); H 为计划湿润层(m); A 为小区面积(hm²); W_1 是灌水前该土层的土壤含水量(%); W_2 为灌溉后的土壤含水量(%),详见表3;湿润层厚度取0.5 m^[16]。成熟时收获各处理中间两垄全部果穗,进行测产,田间直接测定鲜穗重量,带回实验室脱水折算(籽粒含水率14%)实际产量。

1.3 数据分析

采用DPS软件进行统计分析;用Excel 2003和Sigmaplot 10.0进行数据整理和作图。

2 结果与分析

2.1 产量模型的建立

当有 P 个变量时,二次回归模型的一般式为: $\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^p b_{ij} x_j^2$,失拟性检验可知, $F_{L_f} = 3.68$,查 F 表得 $F_{0.05} = 9.01(5, 3)$,所以 $F_{L_f} < F_{0.05}$,可知回归方程的失拟性不显著,说明其他因子对玉米产量的影响是可以忽略的,表明试验选择的4个因子研究玉米产量的变化是可行的,因此,可以对方程进行显著性检验。显著性检验可知, $F = 13.91$,查 F 表得 $F_{0.05} = 3.31(11, 8)$,所以 $F > F_{0.05}$,可知方程达到显著性水平,说明该模型能够反映玉米产量的变化与不同施用量的氮肥、磷肥、钾

表 2 试验组合设计及试验方案

Table 2 Design and treatment of the combined tests

处理 Treatments	X_1	X_2	X_3	X_4	N /(kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)	K ₂ O /(kg·hm ⁻²)	密度 Density /(株·hm ⁻²)
1	1	1	1	1	285	195	135	93750
2	1	1	-1	-1	285	195	45	71250
3	1	-1	1	1	285	65	135	93750
4	1	-1	-1	-1	285	65	45	71250
5	-1	1	1	1	95	195	135	93750
6	-1	1	-1	-1	95	195	45	71250
7	-1	-1	1	1	95	65	135	93750
8	-1	-1	-1	-1	95	65	45	71250
9	-1.682	0	0	0	0	130	90	82500
10	1.682	0	0	0	380	130	90	82500
11	0	-1.682	0	0	190	0	90	82500
12	0	1.682	0	0	190	260	90	82500
13	0	0	-1.682	0	190	130	0	82500
14	0	0	1.682	0	190	130	180	82500
15	0	0	0	-1.682	190	130	90	60000
16	0	0	0	1.682	190	130	90	105000
17	0	0	0	0	190	130	90	82500
18	0	0	0	0	190	130	90	82500
19	0	0	0	0	190	130	90	82500
20	0	0	0	0	190	130	90	82500

表 3 各时期土壤持水量指标

Table 3 Soil water content at different stages

生育时期 Vegetative stages	播种至出苗 VE - V1	出苗至拔节 V1 - V6	拔节至抽雄 V6 - VT	抽雄至吐丝 VT - R1	吐丝至乳熟 R1 - R3	完熟期 R6
土壤相对含水量/% Relative soil water content	70 ~ 75	60 左右	70 ~ 75	80 ~ 85	75 ~ 80	60

肥及种植密度之间的关系。根据 t 检验对回归模型的系数进行显著性分析,在氮肥、磷肥、钾肥及密度 4 个因素中,施氮对玉米籽粒产量的影响最为明显,达到了 0.01 显著性水平,其他几个因素对玉米籽粒产量的影响不显著。

20 种处理下玉米的产量如表 4。利用产量结果,以二次通用旋转组合设计进行回归模拟,得到产量 (Y) 与氮 (X_1)、磷 (X_2) 钾 (X_3)、密度 (X_4) 4 因子的回归模型:

$$Y = 15634.14544 + 996.03226X_1 + 74.22154X_2 - 177.10671X_3 + 126.47224X_4 - 984.79710X_1^2 - 1927.96262X_2^2 - 1476.57218X_3^2 - 593.04228X_4^2 + 801.05625X_1X_2 - 25.03125X_1X_3 - 82.21875X_1X_4 \quad (1)$$

表 4 氮、磷、钾和密度处理下的玉米产量

Table 4 Yields of maize under different treatments of nitrogen, phosphate, potash and density

处理 Treatments	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	处理 Treatments	产量/(kg·hm ⁻²) Yield
1	11661.45	11	9320.25
2	12854.70	12	10899.15
3	10477.95	13	10755.75
4	11654.85	14	12017.10
5	8033.10	15	13557.75
6	9438.75	16	14213.10
7	10366.35	17	16401.90
8	11130.60	18	15607.50
9	11016.60	19	15340.80
10	14538.15	20	15353.55

2.2 模型分析

2.2.1 试验因子的产量效应分析 主因子效应分析:试验设计中各因素均经无量纲线性编码处理,且各一次项系数与交互项、平方项的回归系数间都是不相关的,所得偏回归系数已标准化。故其回归系数绝对值的大小可直接反映变量 X 对产量 Y 的影响程度。分析产量模型,其主要效应表现为:

1) 一次项 X_1 、 X_2 、 X_4 的系数均为正值, X_3 的一次项系数是负值,说明在试验设计范围内,氮、钾和密度单因子都有增产效应,且由系数绝对值大小判断出两因子对产量影响顺序为施氮量 > 密度 > 施钾量;钾肥单因子对提高籽粒产量有负作用,即随着施钾肥增加,玉米籽粒产量有降低趋势;

2) 交互项 X_1X_2 系数为正值,其余交互项系数为负值,说明施氮与施磷之间的配合对产量的增加具有相互促进作用;

3) 二次项系数均为负值,说明产量随各因素增加均呈开口向下的抛物线趋势变化,即在最佳水平以下时,产量随该因素的增大而增加,当产量水平超过最佳水平时,产量出现下降趋势。

2.2.2 单因子效应分析 在玉米籽粒产量的回归模型中,通过降维分析,分析各因素对产量的影响。将其它三个因素固定在接近适宜的“0水平”,得到各因素的一元二次回归效应模型如下:

$$\text{施氮: } Y = 15634.15 + 996.03X_1 - 984.80X_1^2 \quad (2)$$

$$\text{施磷: } Y = 15634.15 + 74.22X_2 - 1927.96X_2^2 \quad (3)$$

$$\text{施钾: } Y = 15634.15 - 177.11X_3 - 1476.57X_3^2 \quad (4)$$

$$\text{种植密度: } Y = 15634.15 + 126.47X_4 - 593.04X_4^2 \quad (5)$$

在试验设计的因素水平值 $1.682 \sim -1.682$ 范围内,根据这些回归子模型分别作出各因子对玉米籽粒产量影响的效应图,如图 1 所示。

从图 1 可以看出,施氮、施磷、施钾以及种植密度 4 个因素都能影响玉米籽粒产量,并且产量随各因素水平的提高均呈开口向下的抛物线趋势变化,存在产量最高点。符合报酬递减定律。四因素都有明显的增产效应,各抛物线的顶点就是各因素的最高产量值,与其相对应的便是各因素的最适投入量。在本试验中,氮肥的最佳投入量为 1(码值),实际用量则为 $285 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,此时产量可达 $15645.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;磷肥和钾肥的最佳投入量为 0(码值),实际

用量则为 $130 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,此时产量都达 $15634.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;最适种植密度为 0(码值)即种植密度为 $82500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,此时产量可达 $15634.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。到达最适投入量时,产量最高;投入量继续加大,产量则随之减小。由图 1 中还可以看出,在较低投入量时,密度的增产效果略高于其他措施。

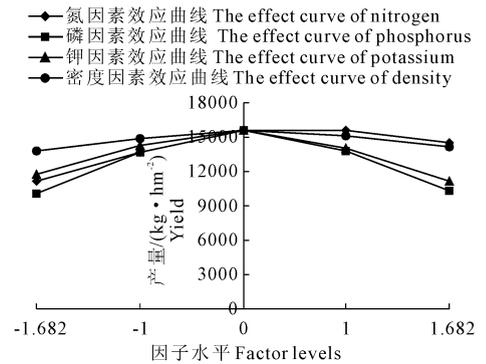


图 1 试验因子的产量效应

Fig.1 Effects of experimental factors on yield

2.2.3 单因素边际效应分析 边际产量可反映各因素的最适投入量和单位水平投入量变化对产量增减速率的影响,各因素在不同水平下的边际产量可通过对回归子模型(2)、(3)、(4)、(5)求一阶偏导,则分别得到氮、磷、钾和密度的各因素的边际效应方程。

$$\text{施氮: } Y = 996.03 - 1969.6X_1 \quad (6)$$

$$\text{施磷: } Y = 74.22 - 3855.92X_2 \quad (7)$$

$$\text{施钾: } Y = -177.11 - 2953.14X_3 \quad (8)$$

$$\text{种植密度: } Y = 126.47 - 1186.08X_4 \quad (9)$$

水肥单因子效应如图 2 所示:当另一因素取编码值为零水平时,随着氮、磷、钾和密度投入量的增加,单位氮、磷、钾和密度投入量的增产作用下降,说明四因素边际效益均呈递减趋势;且边际效益递减率为施磷 > 施钾 > 施氮 > 种植密度。各因子单位水平施入量引起边际产量的减少量为施磷 > 密度 > 施钾 > 施氮。

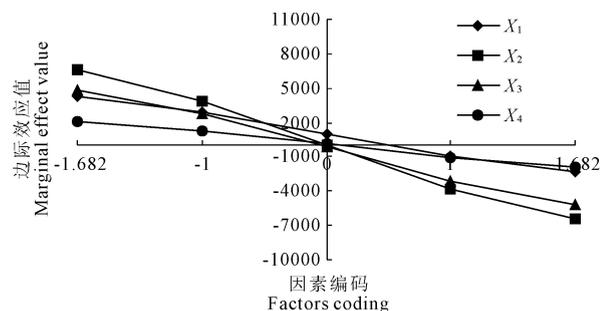


图 2 单因子边际效应

Fig.2 Marginal effects of single factor

2.2.4 因素间交互作用分析 各因素对产量的影响不是孤立的,它们之间存在交互作用。根据回归模型用 Sigmaplot 10.0 作出因素间的交互作用图,以氮和磷,氮和密度以及氮和钾的交互作用回归效应子模型作图(图 3)。曲面图上各点的高度代表两因子一定配比水平时的玉米的产量,曲面的高度越高,说明玉米的产量越高。从图中还可以看出,当一个因子固定在某一水平时,玉米产量随另一因子水平变化的规律。

从图 3(A)可见,当施氮量一定时,施磷量在 $-1.682 \sim 0$ 区间水平的范围内,玉米产量随着施磷量的增加而增加;当施磷量在 $0 \sim 1.682$ 区间水平的

高施磷量范围内,玉米产量随施磷量的增加而降低,这说明在施氮量一定的情况下,施磷量太多或者过少,氮肥效果都得不到最大程度发挥,产量都不能达到最大值。与此同时,在较低的施氮条件下,施磷的增产效应不明显;在较高施氮水平下磷肥的增产效果显著提升。但当施磷量水平较低时,随着施氮量的大量增加可能会造成减产,这种效应符合报酬递减函数。此时,如果加大施用氮肥,则肥料利用率降低。从图 3(A)也可以得出玉米产量的最高值并不产生在施氮量和施磷量最大时,施氮量的高产临界值在 0.5 水平左右,施磷量在 0 水平左右。

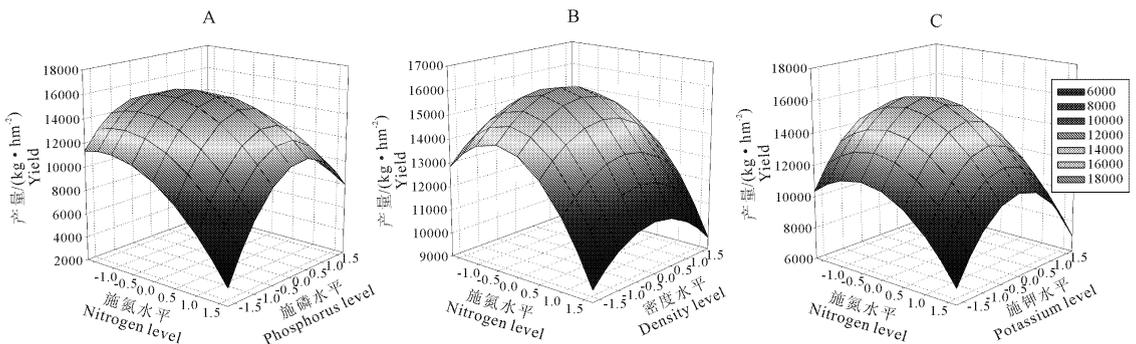


图 3 氮和磷的交互作用(A)、氮和密度的交互作用(B)及氮和钾的交互作用(C)对玉米籽粒产量的影响

Fig. 3 The coupling effects of nitrogen and phosphorus (A), nitrogen and density (B), nitrogen and potassium (C) on corn grain yield

图 3(B)表明,在对玉米籽粒产量的影响方面,施氮量和种植密度具有明显的交互作用,当固定施氮量在一个水平时,玉米产量随着密度的增加呈现先增高后降低的趋势。而当种植密度一定时,施氮量 < 0 编码水平时,玉米籽粒产量随着施氮量的增加,产量明显增加,并且种植密度中等水平(即 0 编码水平时),增产效应的更显著。所以,玉米籽粒产量与施氮量和种植密度的协调配合有密切关系。

图 3(C)表明,施氮量和施钾量表现出了显著的协同增产效应。施氮量处在 0 编码水平,施钾量在 0.5 水平时,此时玉米籽粒的产量最高,为 $15\ 885.96\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;施氮量处在 -1.682 编码水平,施钾量在 -1.682 低水平时,此时玉米产量最低,为 $3\ 454.77\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。当固定施氮量在一个水平时,玉米产量随着施钾水平的提高呈先升高后降低的动态变化趋势,而当施钾水平固定时,且施氮量 < 0 编码水平时,玉米籽粒产量随着施氮量的增加,增产效果显著且增幅较大,但当施氮量 > 0 编码水平时,随着施氮量的增加可能会出现籽粒减产。所以,氮肥和钾肥的施入量过高或过低都会限制产量的提高,不仅降低了肥料利用率,而且发挥不出作物最大的增产潜

力。

2.3 肥密组合优化方案

在本试验条件下获得的最高产量对大面积生产应用来说并不一定能代表实际的最佳水平,为了取得四因素在生产中应用的可靠性,采用频数法进一步解析,在 $-1.682 \sim 1.682$ 约束区间,所得方案中,有 72 套方案玉米产量 $\geq 12\ 231.97\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其优化组合的置信区间见表 5。通过模拟寻优分析,大庆地区玉米要获得 $\geq 12\ 231.97\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的产量,在膜下滴灌条件下,氮肥与磷肥、钾肥、种植密度最优组合取值范围为:氮肥 $246.24 \sim 279.59\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥 $133.77 \sim 151.52\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,钾肥 $82.85 \sim 97.16\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,种植密度 $79\ 676 \sim 85\ 324\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米的经济效益和生态效益达到最佳。

3 结论与讨论

不同处理单因子对寒地半干旱区玉米籽粒产量有较明显的影响,且施氮的影响达到了显著水平。施氮与施磷之间的配合,具有明显的相互促进、协同增产作用。产量随各因素增加均呈开口向下的抛物线趋势变化,符合报酬递减定律。大庆地区玉米要

获得 $\geq 12\ 231.97\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量,氮肥与磷肥、钾肥、种植密度配合最优组合取值范围为:氮肥 $246.24\sim 279.59\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥 $133.77\sim 151.52\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,

钾肥 $82.85\sim 97.16\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,种植密度 $79\ 676\sim 85\ 324\ \text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米的经济效益、社会效益、生态环境效益达到最佳。

表5 优化提取方案中 X_i 取值频率分布表

Table 5 The probability distributions of X_i in the combined applications

因素水平 Factor level	X_1		X_2		X_3		X_4	
	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency	次数 Times	频率 Frequency
-1.6818	0	0	0	0	0	0	9	0.125
-1	4	0.056	7	0.097	17	0.236	17	0.236
0	21	0.292	44	0.611	38	0.528	20	0.278
1	29	0.403	21	0.292	17	0.236	17	0.236
1.6818	18	0.250	0	0	0	0	9	0.125
\bar{x}	0.768		0.194		0		0	
S_x	0.089		0.07		0.081		0.128	
95%的置信区间 95% credible interval	(0.592, 0.943)		(-0.058, 0.331)		(-0.159, 0.159)		(-0.251, 0.251)	
措施范围 Measures range	(246.240, 279.585)		(133.770, 151.515)		(82.845, 97.155)		(79676, 85324)	

近年来,膜下滴灌种植模式在政府、水利部门的扶持下,已经得到大面积推广应用。膜下滴灌与传统耕种模式相比,可增产 78.5%,收益增加 $11\ 425.5\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ [17],同时可明显增温保墒、节水抑盐、促进作物提早成熟、提质增效、省时省工。玉米生产中,高密度及高肥不一定是最高产的,合理的肥密组合能够扩库增源、提高肥料利用率,进而获得高产。将肥密组合与膜下滴灌进行创新集成应用到生产实践中,可减小当前肥密管理的盲目性,能进一步提高肥料的利用率、减轻污染、节本增收。所以,在膜下滴灌技术的基础上,调整合理的肥密组合尤其对水资源匮乏、肥料利用率低的寒地半干旱地区可持续农业发展具有重要的现实意义。本试验主要分析了2014年秋季玉米籽粒产量的数据,具有一定的局限性,尚存在一些不确定性,需要结合一些单因子试验进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 姚丽凤. 借鉴美国经验发展中国的玉米产业[J]. 农业经济, 2008, (7): 46-47, 76.
- [2] 孙德全, 李绥艳, 林红, 等. 黑龙江省玉米主要病害发生原因分析及抗病育种对策[J]. 作物杂志, 2009, (2): 90-93.
- [3] 杨国航, 孙世贤, 张春原, 等. 东北早熟春玉米区玉米生产现状和发展趋势[J]. 玉米科学, 2007, (4): 143-145.
- [4] 刘海燕. 黑龙江省玉米持续增产的主要限制因素与对策[J]. 作物杂志, 2014, (2): 9-13.

- [5] 李楠楠, 张忠学. 黑龙江半干旱区玉米膜下滴灌水肥耦合效应试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (6): 88-90, 94.
- [6] 陈传永, 侯玉虹, 赵明, 等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. 作物学报, 2010, (7): 1153-1160.
- [7] 王国栋, 曾胜和, 陈云, 等. 新疆滴灌春玉米密植高产栽培施肥效应研究[J]. 农业现代化研究, 2014, (3): 376-380.
- [8] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, (3): 563-568.
- [9] Ayars J E, Phene C J, Hutmacher R B, et al. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Wooter Mangament Research Laboratory [J]. Agricultural water Management, 1999, 42 (1): 1-27.
- [10] Ahanners F, Tadees T. Effect of drip furrow irrigation and plant spacing on yield of tomato at dire Dawa, Ethiopia [J]. Agricultural Water Management. 1998, 35(3): 201-207.
- [11] 张秋英, 刘晓冰, 金剑, 等. 水肥耦合对玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2001, (2): 64-67.
- [12] 冯鹏, 王晓娜, 王清邴, 等. 水肥耦合效应对玉米产量及青贮品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, (2): 376-384.
- [13] 胡安焱, 董新光, 魏光辉, 等. 滴灌条件下水肥耦合对干旱区红枣产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, (6): 60-63.
- [14] 牛新湘, 许咏梅, 马兴旺, 等. 地面灌溉条件下高产棉田水肥耦合的产量效应[J]. 干旱地区农业研究, 2009, (1): 53-55, 61.
- [15] 王荣莲, 于健, 赵永来, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室无土栽培水果黄瓜产量的影响[J]. 节水灌溉, 2009, (3): 15-17, 22.
- [16] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 覆膜滴灌对玉米光合特性、物质积累及水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2015, (1): 128-133.
- [17] 李慧萍, 赵乐军. 玉米膜下滴灌高产增收效益分析[J]. 现代农业科技, 2011, (1): 74, 82.