

宁夏回族自治区扬黄灌区密植高产玉米磷素 吸收利用特征及适宜用量分析

郭鑫年¹ 金鑫² 马洪涛² 陈刚¹ 纪立东¹ 梁锦秀¹ 周涛^{1*}

(1. 宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所/宁夏土壤与植物营养重点实验室, 银川 750002;

2. 宁夏同心县农技推广服务中心, 宁夏 同心 751300)

摘要 利用田间试验的方法,研究磷肥(P_2O_5)施用量对宁夏扬黄灌区密植高产玉米产量、磷素吸收积累特征,明确宁夏扬黄灌区玉米生产适宜磷肥用量,以指导当地玉米生产。以正大 12 为供试材料,采用单因素随机区组设计,在玉米密度为 9.75 万株/ hm^2 条件下设置 5 个磷肥(P_2O_5)用量 0、45、90、135 和 180 kg/hm^2 , N 300.0 kg/hm^2 和 K_2O 75.0 kg/hm^2 均一致。从磷肥(P_2O_5)对密植玉米产量、经济效益、土壤磷素平衡和磷肥利用效率的影响进行分析。结果表明:施用磷肥(P_2O_5)增加了玉米穗粒数和百粒重,增产率为 3.1%~7.8%,通过产量获得磷肥(P_2O_5)效应方程为 $Y = -0.0537x^2 + 15.803x + 15450 (R^2 = 0.9819^*)$,通过模拟计算最高产量 P_2O_5 用量为 147.1 kg/hm^2 ,从实际最佳经济产量 P_2O_5 用量为 112.2 kg/hm^2 。经济效益角度分析 P_2O_5 用量在 135 kg/hm^2 时利润最高,比对照增收 5.7%。施用磷肥(P_2O_5)促进了玉米磷素的吸收累积,籽粒、秸秆和地上部磷素累积量,100 kg 籽粒需 P_2O_5 量均随磷肥(P_2O_5)用量的增加呈先升高后降低的趋势,均以施 P_2O_5 135 kg/hm^2 最高,较对照分别提高 24.0%、19.3%、22.1%和 15.7%。 P_2O_5 用量为 135 kg/hm^2 时磷肥利用效率最高为 36.2% ($P < 0.05$),磷肥偏生产力、磷肥农学效率和生理利用效率均随着磷肥用量增加呈下降趋势。施 P_2O_5 量为 45~135 kg/hm^2 时耕层土壤速效磷均为当季匮乏。从玉米产量、经济效益、土壤磷素平衡和磷肥利用效率多个角度综合分析认为研究区域密植高产玉米磷肥(P_2O_5)用量适宜的范围为 135~147 kg/hm^2 。

关键词 宁夏扬黄灌区; 玉米; 磷素吸收积累; 适宜用量

中图分类号 S513.062

文章编号 1007-4333(2019)07-0044-09

文献标志码 A

Phosphorus absorption,utilization characteristics and suitable application rate of high-density maize in Ningxia Yellow River irrigation area

GUO Xinnian¹, JIN Xin², MA Hongtao², CHEN Gang¹, JI Lidong¹, LIANG Jinxiu¹, ZHOU Tao^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment/Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China;

2. Agricultural Comprehensive Development Office of Tongxin Municipality, Tongxin 751300, China)

Abstract A field experiment was conducted to study the effect of phosphorus fertilizer application on the yield and phosphorus absorption and accumulation of condensed planting high-yield maize in Ningxia Yellow River irrigated area. The aim of this study was to optimize the appropriate amount of phosphate fertilizer to guide maize production in this area. A total of 5 phosphorus levels were designed in this experiment including 0, 45, 90, 135, 180 kg/hm^2 under the same condition of nitrogen (N 300.0 kg/hm^2) and potassium (K_2O 75.0 kg/hm^2). The results showed that: The number of maize spikes and grain weight was increased by applying phosphate fertilizer; The yield of maize increased from

收稿日期: 2018-05-21

基金项目: 宁夏农林科学院全产业链示范推广项目(NKYZ-16-0903),宁夏回族自治区重点研发计划项目(2017BY085)共同资助共同资助

第一作者: 郭鑫年 硕士研究生, E-mail: gxnian@163.com

通讯作者: 周涛, 研究员, 主要从事土壤生态方面研究, E-mail: zhoutao6084609@163.com

3.1% to 7.8%; The effect equation of maize phosphate fertilizer was $Y = -0.0537x^2 + 15.803x + 15450$ ($R^2 = 0.9819^*$), Calculated by equation simulation; Computational acquisition maximum yield application P_2O_5 was 147.1 kg/hm^2 ; The best economic yield of P_2O_5 was 112.2 kg/hm^2 . From the perspective of economic benefit, the profit of phosphate fertilizer was the highest when using 135 kg/hm^2 treatment, its income increased 5.7% more than the control. The application of phosphate fertilizer increased phosphorus accumulation in grains, straw and aerial parts of maize by 24.0%, 19.3%, 22.1% and 15.7% compared to those of the control. When the amount of phosphate fertilizer was 135 kg/hm^2 , the maximum utilization efficiency of phosphate fertilizer was 36.2% ($P < 0.05$). The partial productivity, agronomic efficiency and physiological efficiency decreased with the increase of phosphate fertilizer. The amount of phosphorus in 45–135 kg/hm^2 in the range of soil available phosphorus was deficient. According to the comprehensive analysis of maize yield, economic benefit, soil phosphorus balance and utilization efficiency of phosphate fertilizer, it was concluded that the suitable application range of high yield corn phosphate fertilizer in the study area was 135.0 to 147.1 kg/hm^2 .

Keywords Ningxia Yellow River irrigation area; maize; phosphorus uptake and accumulation; suitable amount of phosphate fertilizer

宁夏玉米栽培面积变化趋势与全国发展相同,作为重要的粮食作物在农业生产中占有越来越重要的地位,2005—2015年的种植面积由17.74万 hm^2 提高到30.2万 hm^2 ,提高了70.1%,其中宁夏回族自治区中部扬黄灌区占比全区玉米种植面积由18.1%上升到22.6%,该区域玉米生产在国内具有综合比较优势,尤其是效率优势突出^[1]。赵如浪等^[2]连续4年对宁夏回族自治区扬黄灌区玉米高产潜力进行分析认为高产田收获密度平均为9.97万株/ hm^2 ,玉米产量高达16927.01 kg/hm^2 ,属于典型的密植高产区。同心县是宁夏回族自治区中部干旱带的核心区域,通过扬黄工程引用黄河水灌溉实现了从旱作区向灌溉区的转变,土地利用类型进而发生深刻变化,近年来同心县玉米栽培面积的不断上升已达2.67万 hm^2 ,明确玉米磷肥的适宜用量对于该区域玉米高产及节本增收具有重要的意义。

磷素是玉米的敏感性元素,直接参与玉米光合作用中的光合磷酸化和碳水化合物合成与运转及其体内多个代谢过程,对提高玉米产量具有不可替代的作用^[3-4]。玉米吸收的磷素来源于外源磷肥的施入和土壤速效磷的供给2个部分,磷素与氮素不同,其在土壤中移动性弱,但在植物体内移动性强,在石灰性土壤上磷肥有效性降低,缺磷逐步成为限制玉米进一步高产的主要因素^[5]。通常情况下依靠增施磷肥解决土壤中有效磷不足问题使玉米获得高产,这在我国北方玉米生产中得到普遍验证^[6],但与我国磷肥目前总体生产量下降呈鲜明的对比^[7]。目前,我国北方春玉米产区年施磷量达0.0213亿t,比正常施磷量多25.1%,但磷素利用效率却由20世

纪50年代中期的52.6%下降到18.1%^[8],前人有关玉米磷素营养的研究主要集中在不同时期、施用方式对玉米生长及产量的影响等方面,表明在低磷土壤上,施磷200 kg/hm^2 ,集中深施在15cm土层时效果最好^[9],施磷量一定的条件下,在玉米生育后期追施磷肥可有效提高产量,较一次性基施处理高0.82%^[6]。全国范围来看,磷素被大量施入农田,远远超过作物生长需要而造成土壤磷富余,农田土壤磷平衡存在很大时空变异,不同区域及不同作物间磷平衡呈现“两极化”发展趋势^[10]。玉米生产中通过提高种植密度是获得玉米高产的重要途径,逐步增加种植密度是今后玉米高产栽培的发展趋势,玉米种植密度增加会改变个体的生长空间,导致土壤磷素资源受限,引起群体内对磷素养分的竞争加剧^[11]。王永宏等^[12]研究认为,宁夏扬黄灌区玉米生产通过合理的养分调控比引黄灌区有更高的产量潜力,但该区域土壤以灰钙土为主,土壤pH在8.7左右,直接影响土壤无机磷的迁移转化、生物有效性、存在状态以及溶解性^[13],玉米种植密度提高获得高产的前提下必然对磷肥用量及施用方式提出新的要求。基于此,本研究在宁夏扬黄灌区同心县玉米种植密度为9.75万株/ hm^2 条件下,明确不同磷肥用量密植玉米磷素吸收累积特征,以磷肥利用效率、土壤磷库平衡、经济效益等多个角度提出密植高产玉米磷肥适宜用量,旨在为宁夏扬黄灌区玉米生产提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验设计

于2016年4—10月在宁夏回族自治区中部扬

黄灌区同心县丁塘镇河草沟村(37°08'40"N, 105°45'24"E)进行。供试土壤为灰钙土土壤质地为沙壤土,土壤肥力中等,耕层试验前土壤 pH 8.65、全盐 0.47 g/kg、有机质 9.8 g/kg、全氮 0.62 g/kg、碱解氮 58.3 mg/kg、有效磷 22.1 mg/kg、速效钾 162.4 mg/kg。试验在调研了研究区域农户玉米氮、钾肥常规施肥基础上,确定试验氮肥用量为 N 300.0 kg/hm²、钾肥用量为 K₂O 75.0 kg/hm² 磷肥用量设计 5 个处理,即 P₀、P₄₅、P₉₀、P₁₃₅ 和 P₁₈₀(下标表示 P₂O₅ 用量,kg/hm²)。氮、磷和钾肥料品种分别为尿素(N 质量分数为 46%)、重过磷酸钙(P₂O₅ 质量分数为 46%)、硫酸钾(K₂O 质量分数为 50%)。50%氮肥作基肥,50%氮肥作追肥,在玉米五叶期定苗后按不同处理在各小区撒施;其他肥料在玉米播种前一次性施入土壤。小区面积 60.0 m²,重复 3 次,随机区组排列,田间密度 9.75 万株/hm²,其他栽培管理方式同当地大田常规措施。供试玉米品种为正大 12 号。2016 年 4 月 1 日人工开沟播种,5 月 6 日定苗,9 月 27 日收获,各小区单打单收。

1.2 样品采集与测定

试验整地结束后在玉米播种前采集 0~20 cm 5 点混合土样用于测定土壤基础理化性质。玉米成熟期选择小区内长势均一的植株随机采集 20 株玉米进行穗粒数、百粒重测定。将玉米籽粒、秸秆制备风干样品,测定玉米地上部磷素养分。籽粒产量和秸秆产量以各小区实收风干重计量,地上部生物量以籽粒产量+秸秆产量计算。土壤理化性状测定采用常规农化分析方法测定,植株养分测定采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解,磷素采用钼锑抗比色法^[14]。

1.3 计算公式及统计方法

参照近年来国内外对肥料利用率的评价方法与指标,应用以下定量评价指标来评价施用磷肥的利用效率^[9]:

磷肥偏生产力/(kg/kg)(P₂O₅) = 施磷区籽粒产量/磷肥施用量;

磷肥表观利用率/% = (收获期施磷区地上部总吸磷量 - 收获期不施磷区地上部总吸磷量) / 磷肥施用量 × 100;

磷肥农学效率/(kg/kg)(P₂O₅) = (施磷区籽粒产量 - 不施磷区籽粒产量) / 磷肥施用量;

磷肥生理利用率/(kg/kg)(P₂O₅) = (施磷区籽粒产量 - 不施磷区籽粒产量) / (收获期施磷区地上

部总吸磷量 - 收获期不施磷区地上部总吸磷量);

收获指数/(kg/kg) = 籽粒产量/地上部总生物量;

磷肥贡献率/% = (施磷肥区产量 - 不施磷肥区产量) × 100 / 施磷肥区产量;

试验数据采用 Excel 2007 进行数据整理,用 DPS 7.05 软件进行统计分析,结果均用 SSR 法检验 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 玉米穗部特征及产量

表 1 结果显示,玉米穗粒数和百粒重是影响玉米产量的主要因素,在施用 300 kg/hm² N 和 75 kg/hm² K₂O 基础上随着磷肥用量的增加玉米穗粒数和百粒重均有先升高后降低的趋势,其中 P₁₃₅ 处理最高,较对照分别提高 5.5%、4.5%,差异显著($P < 0.05$)。增施磷肥,可提高玉米籽粒、秸秆产量,与不施磷对照相比,施磷后玉米籽粒增产量为 481.8~1 200.0 kg/hm²,平均增加 911.9 kg/hm²,增产率为 3.1%~7.8%,平均增产率 5.89%。玉米秸秆增产量为 1 026.5~1 910.5 kg/hm²,平均增加 1 450.7 kg/hm²,增产率为 6.1%~11.4%,平均增产率 8.6%。均为 P₁₃₅ 处理最高,与对照差异显著($P < 0.05$)。由于施磷后对玉米籽粒和秸秆产量产生影响,从而影响了地上部生物量的变化趋势,施磷后生物量平均提高 7 730.6 kg/hm²,平均增产率 5.9%。不同磷肥用量也会影响玉米收获指数,不施磷处理具有最高的收获指数,而施磷处理则相对较低,但不同处理间无显著差异。磷肥的施用对于促进玉米的生长发育具有明显作用,但磷肥施用量需保持在 135 kg/hm² 才能达到提高籽粒产量的目的。

2.2 高产玉米磷素累积与分配

玉米成熟期各器官养分含量及累积量可以表征玉米对养分的吸收利用的状况。表 2 结果显示,成熟期玉米籽粒磷素(P₂O₅)吸收量和累积量随着磷肥用量的增加呈先升高后降低的趋势,其中 P₁₃₅ 处理籽粒磷素吸收量和累积量最高,分别为 0.43% 和 164.4 kg/hm²,较不施磷对照分别提高 17.2% 和 24.0%,差异显著($P < 0.05$),磷素在籽粒中的分配比例为 60.9%,但与高磷处理(P₁₈₀)之间无显著差异,表明增施磷肥有效提高了籽粒的磷素吸收累积量,是提高玉米籽粒产量的重要因素。与籽粒产量结果趋势相同,玉米秸秆磷素含量与累积量均以

表 1 不同施磷量对高产玉米产量的影响

Table 1 Effect of different phosphorus application on yield of high yield maize

处理 Treatment	穗粒数 Spikelets per panicle	百粒重/g 100-grain weight	籽粒产量/ (kg/hm ²) Grain yield	秸秆产量/ (kg/hm ²) Straw yield	地上部生物量/ (kg/hm ²) Biomass	收获指数/ (kg/kg) Harvest index
P ₀	622.0±23.1 b	33.1±1.3 a	15 490.2±460.4 c	16 811.5±365.7 b	32 645.7±188.1 c	0.94±0.035 a
P ₄₅	629.3±18.9 b	33.5±0.8 a	15 972.0±138.7 bc	17 838.0±601.7 ab	33 466.0±1 168.2 bc	0.88±0.012 a
P ₉₀	651.4±17.6 a	34.4±1.4 a	16 433.0±156.1 ab	18 516.0±1 246.0 a	34 949.0±1 155.9 ab	0.89±0.065 a
P ₁₃₅	656.6±22.4 a	34.6±0.9 a	16 690.2±361.8 a	18 722.0±960.8 a	35 412.2±1 001.9 a	0.89±0.050 a
P ₁₈₀	637.1±24.1 ab	34.0±1.1 a	16 513.2±418.0 ab	17 973.0±261.4 ab	34 486.2±374.7 ab	0.92±0.030 a

注：同一列数据不同小写分别代表差异达 5% 显著水平，下同。

Note: Data with different lowercases are significantly different among different treatments at $P < 0.05$. The same below.

表 2 玉米磷素吸收积累量与分配比例

Table 2 Absorption, accumulation and distribution ratio of phosphorus in maize

处理 Treatment	籽粒含磷 质量分数/% Phosphorus content of grains	秸秆含磷 质量分数/% Phosphorus content of straw	籽粒 P ₂ O ₅ 吸收与分配 Grains P ₂ O ₅ Absorption and distribution		秸秆 P ₂ O ₅ 吸收与分配 Straw P ₂ O ₅ Absorption and distribution		地上部吸 P ₂ O ₅ 量/ (kg/hm ²) Upper ground absorption P ₂ O ₅	100 kg 玉米籽粒 P ₂ O ₅ 吸收量/kg 100 kg corn seed P ₂ O ₅ absorption
			积累量/(kg/hm ²) Cumulative amount	分配比例/% Percentage distribution	积累量/(kg/hm ²) Cumulative amount	分配比例/% Percentage distribution		
P ₀	0.367±0.0058 d	0.23±0.010 0 b	132.7±2.66 d	60.0±2.00 ab	88.7±5.76 c	40.0±2.00 ab	221.4±3.64 d	1.40±0.035 c
P ₄₅	0.387±0.005 8 c	0.23±0.005 8 b	138.8±5.36 cd	59.2±1.17 ab	95.5±4.91 bc	40.8±1.17 ab	234.3±8.64 c	1.50±0.006 b
P ₉₀	0.383±0.005 8 c	0.25±0.005 8 a	145.0±1.92 c	58.3±1.43 b	104.0±4.89 a	41.7±1.43 a	248.9±3.11 b	1.52±0.032 b
P ₁₃₅	0.430±0.010 a	0.25±0.005 8 a	164.6±3.94 a	60.9±1.55 a	105.8±4.40 a	39.1±1.55 b	270.3±1.35 a	1.62±0.030 a
P ₁₈₀	0.407±0.012 b	0.24±0.001 ab	153.7±6.88 b	60.8±1.61 a	99.1±2.25 ab	39.2±1.61 b	252.8±4.66 b	1.53±0.020 b

P₁₃₅处理最高,但与P₉₀处理间无显著差异,秸秆磷素分配比例以P₉₀处理最高,为41.7%,与其他处理差异显著。施用磷肥提高了玉米地上部磷素累积量,随着磷肥用量增加地上部磷素累积量呈先升高后降低趋势,与对照相比磷素累积量提高5.8%~22.1%,其中P₁₃₅处理地上部磷素累积量最高,与其他处理差异显著。不同磷肥用量下每生产100 kg玉米籽粒所需要吸收的P₂O₅量随施磷量的增加而增加,低磷(P₄₅和P₉₀)和高磷处理(P₁₈₀)处理间无显著差异,由此,合理施磷可显著提高100 kg玉米籽粒需P₂O₅量($P < 0.05$)。

2.3 高产玉米磷肥利用率

玉米磷肥利用率结果见表3。结果表明,施用磷肥提高了玉米磷肥利用效率17.4%~28.7%,其中施用量在130 kg/hm²磷肥利用效率最高为36.2%,与其他处理差异显著,但随着磷肥用量进一步增加玉米磷肥利用效率反而降低,高磷处理(P₁₈₀)较P₄₅、P₉₀和P₁₃₅处理分别降低了64.9%、73.8%和108.0%,表明磷肥的合理施用量是提高

本地区玉米磷肥利用效率的重要措施。随着磷肥施用量的增加玉米磷肥偏生产力显著下降,由施磷45.0 kg/hm²时的347.3 kg/kg快速下降至施磷量为180 kg/hm²时的91.8 kg/kg,且各施磷处理间差异显著($P < 0.05$),表明在较高的磷肥施用量下反而得到偏低的偏生产力,本地区玉米生产中施用磷肥后对玉米生长具有明显的促进作用,但随着施磷量的增加,这种促进作用会逐渐减弱。比较各施磷处理的磷肥农学效率随着磷肥用量增加呈逐步降低的趋势,由于研究区域土壤肥力呈中等水平,土壤有效含量达到22.1 mg/kg,加之农户习惯施肥中磷肥投入量较高,与氮肥不同,磷肥在土壤中呈逐年累积状态,进一步说明提高磷肥用量并不能提高玉米的产量及对磷肥的吸收效率。磷肥生理利用率结果显示低磷处理最高,但与其他施磷处理间无显著差异。在本研究条件下,磷肥贡献率变化范围为3.02%~7.12%随磷肥用量的增加磷肥贡献率随磷肥用量增加呈先升高后降低趋势,其中P₁₃₅处理最高与其他处理有显著性差异。

表3 玉米磷肥利用效率

Table 3 Utilization efficiency of maize phosphate fertilizer

处理 Treatment	磷肥利用 效率/% Phosphorus fertilizer utilization efficiency	磷肥偏生产力/ (kg/kg) Phosphorus fertilizer partial productivity	磷肥农学效率/ (kg/kg) Phosphate fertilizer agronomy efficiency	磷肥生理利用 效率/(kg/kg) Physiological use of phosphate fertilizer	磷肥贡献率/% Phosphorus fertilizer contribution rate
P ₄₅	28.7±11.58 ab	347.3±12.83 a	16.6±10.37 a	56.7±15.24 a	3.02±2.97 b
P ₉₀	30.6±7.09 ab	182.6±1.72 b	13.4±4.62 ab	33.4±6.40 a	5.74±2.44 ab
P ₁₃₅	36.2±2.93 a	123.6±2.65 c	10.9±6.61 ab	23.8±14.50 a	7.12±4.71 a
P ₁₈₀	17.4±3.23 b	91.8±2.34 d	7.2±2.11 b	31.1±16.30 a	6.15±3.80 ab

2.4 土壤磷库表现平衡

合理施磷可以维持土壤磷库的平衡,本研究条件下玉米播前土壤耕层供量为61.0 kg/hm²,玉米收获后土壤速效磷含量随着磷肥用量的增加而显著提高,与对照相比施磷处理分别提高25.0%、40.1%、69.2%和186.6%,耕层土壤磷素相应提高,说明外源磷肥的投入是土壤磷库的主要来源。磷平衡作为一种衡量土壤磷素投入产出的方法,反映着玉米当季土壤磷盈余或缺的情况,本研究磷素的输入主要来源于磷肥的投入、灌溉水两部分,磷

素的表现平衡是耕层土壤供磷量+磷素输入总量与玉米携出量+土壤磷素残留量的差值。土壤磷素表现平衡结果(表4)可知,磷素的输出项中,玉米磷素携出量并没有随着施磷水平的提高而增加,当施磷量超过135 kg/hm²后玉米携出量开始下降,对照处理由于仅有土壤供磷,耕层土壤磷素表现平衡为-118.2 kg/hm²,施磷量为45~135 kg/hm²的耕层土壤均为当季匮乏,磷肥投入量为180 kg/hm²时土壤磷库为盈余状态,表明磷肥的过量投入降低了玉米磷素携出量增加了磷素在土壤中的累积。

表 4 施磷量对磷肥表观平衡的影响

Table 4 Effect of phosphorus application on apparent balance of phosphate fertilizer

平衡项 Balance item	项目 Item	处理 Treatment				
		P ₀	P ₄₅	P ₉₀	P ₁₃₅	P ₁₈₀
	播前土壤速效磷/(mg/kg)	22.1	22.1	22.1	22.1	22.1
	播前土壤供磷量/(kg/hm ²)	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0
输入	磷肥/(kg/hm ²)	0.0	45.0	90.0	135.0	180.0
	灌溉水/(kg/hm ²)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	总输入/(kg/hm ²)	66.0	111.0	156.0	201.0	246.0
	玉米地上部分磷素携出总量/(kg/hm ²)	221.4 d	234.3 c	248.9 b	270.3 a	252.8 b
输出	收获后土壤速效磷/(mg/kg)	17.2	21.5	24.1	29.1	49.3
	收获后土壤残留磷/(kg/hm ²)	37.2	46.4	52.1	62.9	106.5
表观平衡	土壤盈亏量/(kg/hm ²)	-118.2	-76.9	-40.8	-6.4	99.7

2.5 高产玉米经济效益及磷肥适宜用量

施肥的目的在于提高产量,获取最大经济效益,同时通过产量获得最佳的施肥水平,将表 1 中实粒产量与施磷量采用一元二次方程进行拟合,获得本地区高产玉米磷肥效应方程: $Y = -0.0537x^2 + 15.803x + 15450$ ($R^2 = 0.9819^*$)施磷量和玉米籽粒产量之间有极显著的二次曲线关系,玉米最高产量施磷量为 147 kg/hm²,最佳经济产量施磷量为 112 kg/hm²,表明本地区的磷肥施用用量为 112~147 kg/hm²。进一步从经济效益角度分析(表 5)除去其他成本的投入磷肥的施用获得能够获得一

定利润,增收 500.9~1110 元/hm²,磷肥用量在 135 kg/hm² 时利润最高,较不施磷肥收入提高 5.7%。由于本地区属于玉米高产区,加之土壤速效磷含量中等偏上水平,本研究条件下玉米产投比的差异主要由磷肥的投入决定,造成随着玉米磷肥投入量的增加产投比下降,磷肥投入为 180 kg/hm² 时产投比仅为 3.2,因此磷肥的合理施用能够有效提高玉米经济效益。根据以上结果,考虑产量和经济效益满足高产、高收入的要求,宁夏扬黄灌区玉米高产区的磷肥施用水平以 135.0 kg/hm² 为宜。

表 5 经济效益分析

Table 5 Economic benefit analysis

处理 Treatment	籽粒产量/ (kg/hm ²) Grain yield	投入成本/(元/hm ²) Cost					总投入 Total input	产值/ (元/hm ²) Output value	利润/ (元/hm ²) Profit	产投比 Production ratio
		磷肥 Phosphorus fertilizer	氮肥 Nitrogen fertilizer	钾肥 Potash fertilizer	机械 Mechanical	农药 Pesticide				
P ₀	15 490.2	0.0	1 170.0	480.0	2 400.0	1 200.0	5 250.0	24 784.3	19 534.3	3.7
P ₄₅	15 972.0	270.0	1 170.0	480.0	2 400.0	1 200.0	5 520.0	25 555.2	20 035.2	3.6
P ₉₀	16 433.0	540.0	1 170.0	480.0	2 400.0	1 200.0	5 790.0	26 292.8	20 502.8	3.5
P ₁₃₅	16 690.2	810.0	1 170.0	480.0	2 400.0	1 200.0	6 060.0	26 704.3	20 644.3	3.4
P ₁₈₀	16 513.2	1 080.0	1 170.0	480.0	2 400.0	1 200.0	6 330.0	26 421.1	20 091.1	3.2

注:不计入人工成本;磷肥价格 6.0 元/kg、氮肥价格 3.9 元/kg、钾肥价格 6.4 元/kg、玉米价格 1.6 元/kg、机械成本包括(深翻犁地 1 200 元/hm²、旋耕 750 元/hm² 和播种 450 元/hm²)农药成本 1 200 元/hm²。

Note: Labor costs not included; Phosphorus fertilizer price 6.0 yuan/kg, nitrogen fertilizer price 3.9 yuan/kg, potassium fertilizer price 6.4 yuan/kg, corn price 1.6 yuan/kg, Mechanical input costs include (Deep ploughing 1 200 yuan/hm², spinning 750 yuan/hm², sowing 450 yuan/hm²) Pesticide cost 1 200 yuan/hm².

3 讨论与结论

玉米作为重要的粮食作物在我国农业生产和国民经济发展中占有越来越重要的地位。高产田对我国粮食总产的贡献率达 54.1%^[15]。玉米增密种植具有较大增产潜力,多年来大量研究和实践表明增加种植密度是提高产量的有效途径,美国玉米带种植密度为 82 500 株/hm² 左右获得较高的产量,而我国玉米主产区种植密度约为 60 000 株/hm²,增密种植成为玉米获得高产的首选措施^[16],但玉米增密种植后养分供应量及供应方式势必发生根本性变化。宁夏回族自治区中部干旱带扬黄补充灌溉区由于太阳总辐射、生理辐射、日照时数及日照百分率均表现出较强的优势而具有高产潜力^[12]。随着玉米产量的不断提高,肥料投入也在增大,玉米生产对化肥的依赖程度达到了 40%~50%^[17]。磷素成为继氮肥之后的又一高产限制因子,而施用磷肥的增产效果显著提高^[18]。磷肥的合理施用是玉米高产及协调土壤供磷水平的一个重要途径。大量研究结果已经证实合理施用磷肥能够提高玉米产量,不同地区玉米磷肥的其合理的用量为 75、112 和 150 kg/hm²^[19-20],由于不同地区的研究土壤供磷及玉米品种的基因型差异造成了玉米适宜用量的不同,但磷肥用量总体上不超过 150 kg/hm²。本研究结果表明玉米在高密度条件下(9.75 万株/hm²)磷肥用量为 135.0 kg/hm² 时玉米穗粒数和百粒重均最高,由此提高了玉米产量,增产率达到了 7.8%,秸秆产量和地上部生物量也相应最高,但随着磷肥用量的进一步增加各部分产量则出现下降趋势。已有研究结果表明宁夏扬黄灌区同心县河西镇在基础条件较差的土壤上连续创造高产,其施磷肥施用量达 207.15 kg/hm²^[12],本研究通过磷肥对产量的影响获得的一元二次方程计算最佳经济产量施磷量和最高产量施磷量分别为 112 和 147 kg/hm²,从经济效益角度分析,磷肥用量在 135 kg/hm² 时利润最高,较对照增收 5.7%。大量研究结果表明,不施磷土壤磷素处于耗竭状态,周宝库等^[21]在东北研究连续 23 年不施肥土壤速效磷降低 60%,长期施用磷肥速效磷增加 6~15 倍。赵靛等^[22]在北疆灰漠土区通过 2 年定位试验研究结果表明,施磷量为 150 kg/hm² 时土壤速效磷含量基本维持平衡,高于此用量后耕层土壤速效磷在积累明显,本研究认为在中等肥力土壤上保证玉米高产的同时磷肥用量在 135 kg/hm²

时土壤速效磷匮乏量较少。有研究表明^[23]在高肥力土壤上,玉米产量随着施磷量的增加而增加,但当纯磷用量超过 135 kg/hm² 时,增产率反而下降,在低肥力土壤上,对玉米产量的贡献最高的氮肥,其次为磷肥和钾肥,在低肥力条件下,玉米生产中应采取重氮磷补钾的原则。

玉米各器官内养分的积累是其生物量与产量形成的基础,施用磷肥也可以显著促进玉米地上部对磷素的吸收累积,但是过量施用的磷造成作物对磷素的奢侈吸收并没有起真正的肥效。掌握玉米在各部分对磷素的需求,对于指导玉米磷肥合理施用量具有重要意义。彭正萍等^[24]认为施用磷肥能提高玉米各器官磷含量,增加磷素积累量,与本研究结果一致,玉米成熟期玉米籽粒、秸秆及地上部磷素(P₂O₅)累积量和 100 kg 籽粒需磷量均随着磷肥用量的增加呈先升高后降低的趋势,均以施磷 135 kg/hm² 最高,较对照分别提高 24.0%,19.3%、22.1%,15.7%。张智猛等^[25]研究认为,生产 100 kg 玉米籽粒需 P₂O₅ 0.898 kg,生产 100 kg 玉米籽粒需 P₂O₅ 1.376 kg^[24]。本研究 100 kg 玉米籽粒需磷量高于其研究结果的原因是研究区域属于密植高产区,100 kg 籽粒需磷量相应提高,表明适宜的磷肥的用量提高了磷素向籽粒中的运转,为玉米高产形成良好的基础。提高磷肥利用效率是减少土壤磷素残留的重要途径,由于磷在土壤中移动性差,且施入磷肥易被固定等因素的影响,我国作物磷肥的当季利用率多为 10%~25%,与农业发达国家 30%~40%的肥料利用率有较大差距,磷肥利用率逐渐下降的重要原因之一是施肥过量^[26]。玉米磷效率的高低主要取决于玉米根系对磷的吸收效率和磷在玉米体内的利用效率。研究表明,玉米子粒中 56.0%和 85.8%的磷来源于营养器官的再度运输^[27]。刘凯等^[28]选用 2 个夏玉米品(ZD958、DH618)种研究 4 个施磷水平下玉米产量变化结果显示,施磷量为 90 kg/hm² 时,高产玉米可获得较高的磷素利用效率,而随着磷肥用量增加磷肥偏生产力、磷肥农学利用效率和磷肥吸收效率呈现下降趋势,磷素收获指数没有显著变化。本研究认为施用磷肥提高了玉米磷肥利用效率,在 135 kg/hm² 磷肥利用效率最高为 36.2%,但随着磷肥用量进一步增加玉米磷肥利用效率反而降低。磷肥偏生产力、磷肥农学效率均随着磷肥用量增加呈显著下降趋势,表明本地区玉米生产中施用磷肥对玉米生长具有明显的促进作

用,但随着施磷量的增加,这种促进作用会逐渐减弱。

宁夏扬黄灌区玉米获得高产的途径是密植与养分的合理供给,对于广大农户来讲,随着产量的提高磷肥的施用量也逐步增加,成本不断提高,本研究从经济效益角度考虑,在密植条件下合理的磷肥施用是获得高产、高效的有效措施,因此从玉米产量、经济效益、土壤磷素平衡、磷肥利用效率多个角度综合分析认为研究区域密植高产玉米磷肥用量较为适宜 $135\sim 147\text{ kg/hm}^2$,在宁夏扬黄灌区高产玉米生产中具有较大的可行性。

参考文献 References

- [1] 张治华. 宁夏粮食生产力布局结构演变及调整对策研究[J]. 粮食问题研究, 2018(1): 17-24
Zhang Z H. Research on the evolution of the layout structure of Ningxia grain productivity and its adjustment countermeasures[J]. *Grain Issues Research*, 2018(1): 17-24 (in Chinese)
- [2] 赵如浪, 杨滨齐, 王永宏, 赵健, 张文杰, 孙发国, 谢铁娜. 宁夏高产玉米群体产量构成及生长特性研究[J]. 玉米科学, 2014, 22(3): 60-66
Zhao R L, Yang B Q, Wang Y H, Zhao J, Zhang W J, Sun F G, Xie T N. Yield structure and growth characteristics of high yield maize population in Ningxia[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(3): 60-66 (in Chinese)
- [3] 王晋, 强继业, 杨林楠, 杨建平, 张光勇, 许丽仙. 玉米吸收磷素营养的代谢及分布[J]. 西南农业大学学报, 2002, 24(2): 159-160
Wang J, Qiang J Y, Yang L N, Yang J P, Zhang G Y, Xu L X. Metabolism and distribution of p in maize plants[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(2): 159-160 (in Chinese)
- [4] 董树亭, 高荣岐, 胡昌浩. 玉米生态生理与产量品质形成[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2006
Dong S T, Gao R Q, Hu C H. *Eco-physiology and Formation of Yield and Quality in Maize* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [5] 张玉兰, 王俊宇, 马星竹, 陈利军. 提高磷肥有效性的活化技术研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 194-202
Zhang Y L, Wang J Y, Ma X Z, Chen L J. Advances on activating technique research in improving the validity of phosphorus fertilizer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 194-202 (in Chinese)
- [6] 张萌, 曹国军, 耿玉辉, 王聪宇, 王振华, 刘志全, 路立平. 不同施磷方式对吉林省西部超高产玉米磷素吸收积累的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(6): 102-107
Zhang M, Cao G J, Geng Y H, Wang C Y, Wang Z H, Liu Z Q, Lu L P. Effects of different applications of phosphorus on absorption accumulation of super high-yield corn's phosphorus in western Jilin Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(6): 102-107 (in Chinese)
- [7] 王莹. 2016年我国磷复肥行业生产情况及2017年发展趋势[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(6): 1-6
Wang Y. Production of phosphatic compound fertilizer industry in 2016 and its developing trend in 2017 in China[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2017, 32(6): 1-6 (in Chinese)
- [8] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 229-231
Gao Q, Feng G Z, Wang Z G. Present situation of fertilizer application on spring maize in northeast China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 229-231 (in Chinese)
- [9] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 张瑞富, 王志刚, 张玉芹. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 312-320
Fan X Y, Yang H S, Gao J L, Zhang R F, Wang Z G, Zhang Y Q. Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 312-320 (in Chinese)
- [10] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 岳现录, 雷秋良. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 1-8
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, Yue X L, Lei Q L. Research progress on cropland phosphorus balance in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1): 1-8 (in Chinese)
- [11] 严云, 廖成松, 张福锁, 李春俭. 密植条件下玉米冠根生长抑制的因果关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 257-265
Yan Y, Liao C S, Zhang F S, Li C J. The causal relationship of the decreased shoot and root growth of maize plants under higher plant density [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 257-265 (in Chinese)
- [12] 王永宏, 赵如浪, 赵健, 孙发国, 谢铁娜, 张文杰. 引、扬黄灌区玉米高产田($\geq 15\ 000\text{ kg/hm}^2$)特征分析与实现途径[J]. 作物杂志, 2013(5): 108-113
Wang Y H, Zhao R L, Zhao J, Sun F G, Xie T N, Zhang W J. Characteristics and key cultivation techniques of maize high yield plots in yellow river irrigation areas of Ningxia[J]. *Crops*, 2013(5): 108-113 (in Chinese)
- [13] 曲潇琳, 龙怀玉, 谢平, 曹祥会, 王佳佳. 宁夏中部地区典型灰钙土的发育特性及系统分类研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 75-87
Qu X L, Long H Y, Xie P, Cao X H, Wang J J. Genetic characteristics and classification of typical sierozem in central Ningxia, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 75-87 (in Chinese)
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing:

- China Agricultural Press, 2000 (in Chinese)
- [15] 高静. 长期施肥下我国典型农田土壤磷库与作物磷肥效率的演变特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009
Gao J. Evolution characteristics of soil phosphorus pool and efficiency of phosphorus fertilizer in typical cropland of China under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009 (in Chinese)
- [16] 陈国平, 高聚林, 赵明, 董树亭, 李少昆, 杨祁峰, 刘永红, 王立春, 薛吉全, 柳京国, 李潮海, 王永宏, 王友德, 宋慧欣, 赵久然. 近年我国玉米超高产田的分布、产量构成及关键技术[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 80-85
Chen G P, Gao J L, Zhao M, Dong S T, Li S K, Yang Q F, Liu Y H, Wang L C, Xue J Q, Liu J G, Li C H, Wang Y H, Wang Y D, Song H X, Zhao J R. Distribution, yield structure, and key cultural techniques of maize superhigh yield plots in recent years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(1): 80-85 (in Chinese)
- [17] 冯国忠, 焉莉, 王寅, 王少杰, 李金昊, 陈新平, 崔振岭, 樊小林, 高强. 吉林省玉米推荐施肥指标体系的建立[J]. 玉米科学, 2017, 25(6): 142-147
Feng G Z, Yan L, Wang Y, Wang S J, Li J H, Chen X P, Cui Z L, Fan X L, Gao Q. Establishment of index system of fertilizer recommendation for spring maize in Jilin[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(6): 142-147 (in Chinese)
- [18] 范秀艳. 磷肥运筹对超高产春玉米生理特性、物质生产及磷效率的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013
Fan X Y. Effects of phosphorus application on physiological characteristics, matter production and nutrient utilization of super-high yield spring maize[D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [19] 陈书强, 许海涛, 段翠平. 施磷量对玉米生长发育产量构成因子及品质的影响[J]. 河北农业科学, 2011, 15(2): 62-64, 95
Chen S Q, Xu H T, Duan C P. Effects of phosphorus application amount on growth and development, yield components and quality of maize[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(2): 62-64, 95 (in Chinese)
- [20] 陈远学, 李汉邯, 周涛, 陈新平, 黄蔚, 刘静, 张朝春, 徐开未. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2799-2806
Chen Y X, Li H H, Zhou T, Chen X P, Huang W, Liu J, Zhang C C, Xu K W. Effects of phosphorus fertilization on leaf area index, biomass accumulation and allocation, and phosphorus use efficiency of intercropped maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 2799-2806 (in Chinese)
- [21] 周宝库, 张喜林, 李世龙, 丛喜波, 赵瑞广, 张迅雷. 长期施肥对黑土磷素积累及有效性影响的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2004(4): 5-8
Zhou B K, Zhang X L, Li S L, Cong X B, Zhao R G, Zhang X F. Study on soil phosphorus accumulation and its availability through long-term fertilization to balck soil[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2004(4): 5-8 (in Chinese)
- [22] 赵靓, 侯振安, 李水仙, 刘立鹏, 黄婷, 张扬. 磷肥用量对土壤速效磷及玉米产量和养分吸收的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(2): 123-128
Zhao J, Hou Z A, Li S X, Liu L P, Huang T, Zhang Y. Effects of p rate on soil available P, yield and nutrient uptake of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(2): 123-128 (in Chinese)
- [23] 边秀芝, 盖嘉慧, 郭金瑞, 阎孝贡, 任军, 赵金宝. 玉米施磷肥的生物效应[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 120-122
Bian X Z, Gai J H, Guo J R, Yan X G, Ren J, Zhao J B. Biological effects of phosphorus fertilizer application on maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(5): 120-122 (in Chinese)
- [24] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 王艳群, 刘会玲, 薛世川. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 793-798
Peng Z P, Zhang J T, Yuan S, Wang Y Q, Liu H L, Xue S C. Effects of different phosphorus application rates on the dynamic accumulation and distribution of dry matter and phosphorus in maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 793-798 (in Chinese)
- [25] 张智猛, 戴良香, 郭景伦, 李伯航. 施肥量对高产夏玉米需肥规律的影响[J]. 玉米科学, 1995, 3(4): 56-61, 67. DOI: 10. 13597/j. cnki. maize. science. 1995. 04. 014
Zhang Z M, Dai L X, Guo J L, Li B H. Effect of rate of applied fertilizer on fertilizer requirement of high-yield summer-sown corn [J]. *Maize Science*, 1995, 3(4): 56-61, 67 (in Chinese)
- [26] 张玉兰, 王俊宇, 马星竹, 陈利军. 提高磷肥有效性的活化技术研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 194-202
Zhang Y L, Wang J Y, Ma X Z, Chen L J. Advances on activating technique research in improving the validity of phosphorus fertilizer [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 194-202 (in Chinese)
- [27] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素营养对玉米生育后期干物质和养分积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 799-807
Li W J, He P, Jin J Y. Potassium nutrition on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 799-807 (in Chinese)
- [28] 刘凯, 张吉旺, 郭艳青, 裴书君, 董树亭, 刘鹏, 杨今胜, 赵斌. 施磷量对高产夏玉米产量和磷素利用的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(4): 61-65
Liu K, Zhang J W, Guo Y Q, Pei S J, Dong S T, Liu P, Yang J S, Zhao B. Effects of phosphorus fertilization on yield and phosphorus use efficiency of high-yielding summer maize [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(4): 61-65 (in Chinese)