

干旱绿洲灌区春玉米施磷效应与磷肥投入阈值研究

连彩云¹, 马忠明²

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为明确干旱绿洲灌区春玉米磷肥投入阈值, 于2011—2013年在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站进行了不同施磷量定位试验, 研究施磷量对春玉米的产量、磷肥利用率以及养分平衡的影响。结果表明: 在一定的施磷(P_2O_5 0~170.04 kg/hm²)范围内, 春玉米产量随施磷量的增加而增加, 在 P_2O_5 170.04 kg/hm²时产量(14 337.33 kg/hm²)达到最高, 较其他施磷处理分别增产56.87%、29.38%、20.61%、21.50%, 较不施肥处理增产率达112.84%, 此时磷肥利用率为23.80%, 超过此值则籽粒产量略有降低。磷肥的产量效应与土壤有效磷含量高低有显著关系, 施磷显著增加土壤耕层有效磷(Olsen-P)含量, 较不施肥处理增加9.28%~925.27%。磷肥的投入量大于作物需磷量时, 会加剧土壤磷残留量的增加, 并对土壤水环境造成污染, 适量施磷量(P_2O_5 85.02 kg/hm²)有利于土壤有效磷的平衡。当磷素投入阈值为每年施磷(P_2O_5)170.04 kg/hm²时, 既保证土壤养分平衡, 又减小对环境的影响。综合春玉米产量、磷肥利用率以及磷素平衡并结合试验区的肥力分析认为, 在保证春玉米高产并减少环境污染的前提下, 干旱绿洲灌区春玉米区磷肥投入阈值应为 P_2O_5 85.02~170.04 kg/hm²。

关键词: 春玉米; 施磷效应; 磷肥投入阈值; 产量; 磷素利用率; 养分平衡

中图分类号: S147.22; S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2020)10-0008-07

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2020.10.003

Phosphorus Application Effects and Input Threshold of Spring Corn in The Arid Oasis Irrigation Area

LIAN Caiyun¹, MA Zhongming²

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: In order to clarify the input threshold of phosphate fertilizer of spring corn in the arid oasis irrigation area, a positioning tests of different phosphorus application amount positioning tests was studied on the yield, use efficiency of phosphate fertilizer and nutrient balance of spring corn in Zhangye Water-saving Agricultural Experimental Station of Gansu Academy of Agricultural Sciences from 2011 to 2013. The results showed that within the range of P_2O_5 0 ~ 170.04 kg/hm², the yield of spring corn increased with the increase of phosphorus application. When P_2O_5 was 170.04 kg/hm², the yield (14 337.33 kg/hm²) reached the highest, which increased by 56.87%, 29.38%, 20.61% and 21.50%, respectively, compared with other phosphorus treatment, and the yield increased by 112.84% compared with no fertilizer treatment. At this time, the phosphorus fertilizer utilization rate was 23.80%, and the grain yield decreased slightly when the phosphorus fertilizer utilization rate exceeded this value. The yield effect of phosphorus fertilizer was significantly related to the content of available P in soil. The application of phosphorus significantly increased the content of olsen-P in the topsoil, which was

收稿日期: 2020-05-12; 修订日期: 2020-08-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400207)。

作者简介: 连彩云(1977—), 女, 甘肃民勤人, 副研究员, 主要从事作物节水栽培与土壤肥料研究工作。联系电话: (0)18993156287。Email: liancy1998@sina.com。

通信作者: 马忠明(1963—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 博士, 主要从事农业节水高产栽培理论与技术的研究工作。Email: mazhming@163.com。

9.28%~925.27% higher than that the no-phosphorous treatment. When the Amount of phosphorus fertilizer input is larger than the amount of phosphorus required by crops, it will aggravate the increase of soil phosphorus residue and pollute the soil water environment. The appropriate amount of P applied (P_2O_5 85.02 kg/hm²) is conducive to the balance of soil available P. When the phosphorus (P_2O_5) input threshold is 170.04 kg/hm² per year, the soil nutrient balance is guaranteed and the impact on the environment is reduced. Compositing spring corn yield, phosphorus fertilizer utilization rate and phosphorus balance, and combining with the fertility analysis of the experimental area, it was concluded that the threshold of phosphorus fertilizer input in the spring corn area of the arid oasis irrigation area should be 85.02~170.04 kg/hm² on the premise of ensuring the high yield of spring corn and reducing environmental pollution.

Key words: Spring corn; Efficiency of applying phosphate; Threshold of phosphate fertilizer input; Yield; Phosphorus use efficiency; Nutrient balance

河西走廊属典型的干旱绿洲灌区^[1-3], 种植业以小麦、玉米为主, 自然生态类型、农业灌溉方式和社会经济发展状况具有很强的代表性。近年来, 玉米已成为甘肃省第一大粮食作物, 也是种植面积最广泛的粮饲兼用作物, 在保障全省粮食安全、增加农民收入等方面发挥了重要作用。截至 2017 年, 甘肃省玉米种植面积达 96.7 万 hm², 占全省粮食种植面积的 35%。随着种植面积的增加, 化肥、农药、地膜、机械化生产等必要性投入品也在逐年增加, 作物产量有显著提高, 但肥料的利用率不高, 造成生产成本逐年增加, 综合效益下降。

磷素是作物生长所必需的重要营养元素之一, 对作物的产量形成及提升地力等有着重要作用。但由于磷素移动性差等原因, 施入土壤后被大量固定, 影响了作物对磷的当季利用, 未被利用的磷在土壤中不断地积累起来^[4], 长期施磷造成土壤磷素向水环境释放^[5-7]。前人的许多试验已经明确施肥对环境的影响。LAND 等^[8]研究发现, 氮、磷对环境的污染大约 50% 是来源于不合理的农业施肥。合理控制施磷量是提高作物产量、提高磷肥利用率及保护环境的前提。针对如何合理施用磷肥达到肥料高效利用, 众多研究者已开展了相关的研究^[9-11]。有研究表明, 在有效磷(Olsen-P)含量为 4.9 mg/kg 的土壤上, 当施磷(P_2O_5)100~200 kg/hm²、施磷深度为 15 cm 时作物产量最高, 磷素利用率最大, 施磷过多会造成植株对磷的奢侈吸

收, 而且磷肥利用效率下降^[12-14]。前人的研究主要是集中于不同磷肥施用量、不同施肥方式等对玉米生长发育及产量的影响, 而且判断农田土壤磷素状况的定量标准在不同地区并不一致, 迄今有关于干旱绿洲灌区春玉米施磷效应及投入阈值的相关研究还鲜见报道。为了研究不同施磷水平对干旱绿洲灌区春玉米的产量效应以及对环境效应的影响, 我们在该区域开展了春玉米磷肥投入阈值研究, 研究了不同施磷水平对春玉米的产量效应、磷素利用率及对养分平衡的影响, 以期为该区域春玉米高产、磷肥高效利用和控制磷素对环境的污染等提供理论依据, 以实现粮食安全和环境友好发展。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2011—2013 年在张掖节水农业试验站(100° 26' E、38° 56' N)进行定位试验。试验区海拔 1 570 m, 地下水位 100 m 以下, 年降水量 129 mm, 蒸发量 2 048 mm, 年平均日照时数 3 085 h, 光热资源丰富。年均气温 7 ℃, ≥ 0 ℃积温 3 388 ℃, ≥ 10 ℃积温 1 963.4~4 032.3 ℃, 气温干燥度 4.19, 具有典型的西北绿洲灌溉农业区的特征。试验地为中壤灌溉土, 0~160 cm 土层土壤平均容重 1.43 g/cm³。播前耕层(0~20 cm)土壤含有机质 18.1 g/kg、全氮 1.4 g/kg、碱解氮 70.9 mg/kg、速效磷 19.3 mg/kg、速效钾 148.0 mg/kg, pH 8.6。

1.2 供试材料

供试肥料为尿素(含 N46%, 由中化化

肥有限公司生产并提供)、重过磷酸钙(含 P_2O_5 46%, 由云南云天化国际化工股份有限公司生产并提供)。指示玉米品种为沈单 16 号, 由沈阳市农业科学院作物研究所提供。

1.3 试验方法

试验共设 6 个施磷水平处理, 分别为: ① P_{00} 处理(CK, 2011—2013 年每年施磷量均为 0); ② P_{01} 处理(2011 年施 100% 优化施磷量, 2012—2013 年每年施磷量均为 0); ③ P_{02} 处理(2011—2012 年每年均施 100% 优化施磷量, 2013 年施磷量为 0); ④ P_1 处理(2011—2013 年每年均施 100% 优化施磷量); ⑤ P_2 处理(2011—2013 年每年均施 200% 优化施磷量); ⑥ P_4 处理(2011—2013 年每年均施 400% 优化施磷量)。试验各处理的优化施磷量均为 P_2O_5 85.02 kg/hm², 试验过程中各处理氮肥施用量均为优化用量, 即 N 270 kg/hm², 均不施钾肥, 全部磷肥和 40% 氮肥作底肥一次施入, 30% 氮肥在玉米大喇叭口期追施(条施), 30% 氮肥在玉米吐丝期追施(条施)。试验随机区组排列, 重复 3 次, 小区面积 30 m²(6 m × 5 m)。试验采用常规半膜覆盖种植方式, 于 4 月 25 日按株距 22 cm、行距 55 cm 播种, 播种量 37.5 kg/hm², 保苗 82 500 株/hm²。全生育期共灌水 4 次, 灌溉定额为 5 250 m³/hm², 在玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆中期分别灌溉, 灌水比例分别为灌溉定额的 20%、30%、30%、20%, 用水表控制每次的灌水量。其余田间管理措施与当地大田相同。

1.4 样品的采集

1.4.1 土样采集及测试 试验开始前选 8 点采集 0~20 土层土壤样品, 玉米收获后每小区采用 S 形 5 点法采集 0~20 cm 土层土壤样品, 风干后测定土壤 Olsen-P、CaCl₂-P。土壤可溶性磷(CaCl₂-P)用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液浸提, 振荡、离心、过滤, 用比色法测定; 土壤速效磷(Olsen-P)用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液浸提, 用比色法测定。

1.4.2 植株样品采集与测试 玉米收获后, 每小区随机选取具有代表性的玉米植株 5 株, 分别采集籽粒和秸秆样品, 用于测试全氮、全磷、全钾。

植株样品采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 用蒸馏法测定全氮含量, 用钒钼黄比色法测定全磷含量, 用火焰光度法测定全钾含量。

1.5 数据处理

玉米地上部吸磷量 = [(地上部籽粒产量 × 籽粒中磷素含量)/1 000] + [(地上部秸秆重量 × 秸秆中磷素含量)/1 000];

磷肥利用率 = [(施磷区作物吸磷量 - 不施磷区作物吸磷量)/施磷量] × 100^[15];

土壤磷的表观平衡 = 磷投入 - 磷支出;

磷肥偏生产力 = 施肥区作物产量/施磷量;

磷肥农学效率 = (施肥区作物产量 - 不施磷区作物产量)/施磷量。

数据采用 Excel 软件处理并绘图, 采用 DPS 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施磷量与玉米产量的关系

由图 1 可看出, 施用磷肥可显著增加玉米籽粒产量。2011、2012、2013 年的玉米产量变化趋势一致, 即均表现为随施磷量的增加, 玉米产量呈先增加, 后下降的趋势。累积施磷量为 85.02、170.04、255.06、510.12、1 020.24 kg/hm² 时, 玉米的 3 a 平均产量分别比对照增加 2 529.73、4 573.49、5 421.71、7 999.73、5 329.94 kg/hm², 增产率分别为 35.68%、64.51%、76.48%、112.84%、75.18%。 P_2 处理的玉米产量最高, 较其余施肥处理分别增产 56.87%、29.38%、20.61%、21.50%, 较不施肥处理(CK)增产高达 112.84%。年施磷量(P_2O_5)超过 170.04 kg/hm² 时, 玉米产量略有降低, 这可能是由于过量施磷使玉米营养生长过快, 导致上部通风不畅, 玉米植株叶片光合能力降低, 抑制了养分的转运, 进而影响玉米籽粒生长。随着年限的增加, 玉

米产量有下降的趋势。P₀₂ 处理平均产量为 11 662.65 kg/hm², P₀₁ 处理平均产量为 9 618.89 kg/hm², P₀₀ 处理平均产量为 7 089.16 kg/hm², 对磷肥反应比较低。适宜施磷量是高产和环保、经济效益相协调的施肥点, 在适宜施磷量附近, 施磷量的增减对产量影响不大。过量施磷时玉米产量不是最高, 而且所施的磷肥自农田通过各种损失途径进入环境, 不但磷肥损失量迅速增加, 而且增大了环境压力。

进一步对试验数据进行回归分析, 建立玉米 3 a 平均产量(Y)与施磷量(P)之间的效应方程:

$$Y = -0.160 7P^2 + 71.943 P + 6 676.2 \quad (R^2 = 0.848 9)$$

由效应方程可知, 产量最高 (14 728.15 kg/hm²) 时的施磷量 (P₂O₅) 为 223.8 kg/hm², 较对照 (P₀₀) 增产 120.6%。施磷量 (P₂O₅) 低于 223.8 kg/hm² 时产量显著降低, 但施磷量 (P₂O₅) 高于 223.8 kg/hm² 时, 作物产量随着施磷量的增加略有下降。回归分析结果与本

试验处理结果基本吻合, 即在当前土壤磷肥力水平下, 施磷量在 170.04 kg/hm² 内, 能够使作物达到高产且对环境影响较小, 继续投入磷肥不仅造成投入成本的增加而且会降低经济效益。

2.2 施磷量对玉米植株吸磷量及磷素利用效率的影响

从表 1 可以看出, 施磷量显著影响玉米地上部的总吸磷量, 施用磷肥或增施磷肥均能促进玉米地上部对磷素的吸收累积, 施磷处理均大于不施磷处理, 2013 年不施磷处理 (CK) 地上部吸磷量为 14.6 kg/hm², 施磷后各处理吸磷量增加了 3.4 ~ 16.0 kg/hm², 但随着年限的增加吸磷规律不同, 2011 年随着施磷量的增加, 玉米的吸磷量增加, 而 2012 年、2013 年随着施磷量的增加, 吸磷量呈先增加而后呈下降趋势, 与施磷量呈抛物线模型, 且相关性较高。施磷量从 0 增加到 170.04 kg/hm² 时, 玉米吸磷量随之增加; 当施磷量为 170.04 kg/hm² 时, 吸磷量为最高峰值, 再增加施磷量则作物的吸磷量降低。

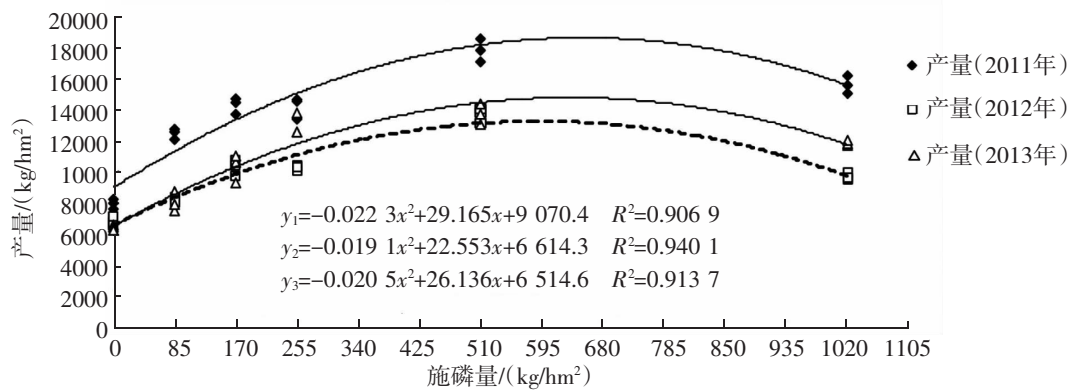


图 1 施磷量与春玉米产量的关系

表 1 不同施磷量处理的玉米吸磷量和磷肥利用率

处 理	吸磷量/(kg/hm ²)			磷肥利用率/%			偏生产力/(kg/kg)			农学利用率/(kg/kg)		
	2011年	2012年	2013年	2011年	2012年	2013年	2011年	2012年	2013年	2011年	2012年	2013年
P ₀₀	22.7b	18.6b	14.6b									
P ₀₁	39.3b	27.3ab	18.0b	19.5ab			147.18ab			53.25ab		
P ₀₂	42.0ab	32.8ab	19.1b	22.7a	6.5b		168.63a	121.08a		74.70a	23.92a	
P ₁	42.9ab	33.1ab	28.2ab	20.7a	6.9b	10.7a	167.52a	120.68a	153.26a	73.59a	23.52a	31.44a
P ₂	57.9a	41.6a	30.6a	23.8a	8.4a	6.8a	105.09b	80.14b	80.98b	78.13a	31.56a	20.07a
P ₄	58.3a	33.7ab	21.9b	10.5b	1.9c	0.8b	46.02c	28.52c	35.01c	22.54b	4.23b	4.56b

磷肥的当季利用率、累积利用率均随着施磷量的增加而降低。施磷第 1 年, 当磷肥 (P_2O_5) 施用量为 85.02 kg/hm^2 、 170.04 kg/hm^2 时, 磷肥利用率为 $19.5\% \sim 23.8\%$, 而最高施磷量 (P_2O_5 340.08 kg/hm^2) 的磷肥利用率仅 10.5% , 且随着施磷年限的增加磷肥利用率显著降低。在 3 a 累积施磷量 (P_2O_5) 为 $1\ 020.24 \text{ kg/hm}^2$ 下, 磷肥利用率仅为 0.8% , 显著降低了磷素的利用率。说明长期定位施磷使大量磷肥固定在土壤中, 磷素当季利用率不高, 造成土壤磷的累积, 进而对水环境产生影响。

肥料的偏生产力是反映试验区土壤基础肥力和施肥量综合效应的重要指标。磷肥施用量对肥料偏生产力和农学利用率均会产生显著影响。施磷量 (P_2O_5) 在 $85.02 \sim 170.04 \text{ kg/hm}^2$ 范围内, 磷肥偏生产力、农学利用率较高, 且在施磷量 (P_2O_5) 为 170.04 kg/hm^2 时农学利用率最高, 而在施磷量 (P_2O_5) 高于 170.04 kg/hm^2 后磷肥的偏生产力及农学利用率迅速下降, 说明过量施磷使得磷肥的增产效果显著降低。

从玉米吸磷量与磷肥利用情况来看, 春玉米磷肥投入阈值为 P_2O_5 $85.02 \sim 170.04 \text{ kg/hm}^2$ 。

2.3 施磷量对土壤有效磷累积的影响

土壤有效磷是决定磷肥效果的最主要因素。从图 2 可知, 不同施磷量下土壤有效磷含量 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 存在显著差异。施磷显著增加土壤耕层 Olsen-P 的含量, 较不施磷处理

增加 $9.28\% \sim 925.27\%$ 。施磷量越多, 土壤有效磷积累量成倍增加。停施磷肥 1 a (2011 年施 P_2O_5 85.02 kg/hm^2 , 2012 年、2013 年不施) 后, 土壤耕层的 Olsen-P 含量并没有降低, 仍然能够继续保持, 说明 2011 年所施入土壤的磷肥有明显的累积作用。

2.4 不同施磷量对玉米养分平衡的影响

养分投入主要由磷肥、氮肥和钾肥中有效成分的含量组成, 产出由作物吸收、损失量组成。对不同施磷条件下土壤养分平衡状况进行分析 (表 2) 表明, 土壤磷素平衡状况受施磷量的影响显著。在不施磷和 3 a 累积施用少量磷肥 (P_2O_5 $0 \sim 170.04 \text{ kg/hm}^2$) 范围内, 土壤中的磷均处于亏缺状态, 而在大量施磷条件下, 土壤磷素处于大量盈余状态, 且随着施磷量的增加盈余量显著增加。高施磷量和低施磷量相比较, 前者能够显著增加土壤中磷素的盈余。在每年施 N 270 kg/hm^2 的条件下, 土壤中氮素略有盈余, 处理之间差异不显著。在不施钾的条件下, 土壤中钾素呈现亏缺状态, 但钾的亏缺并没有影响玉米产量, 说明土壤是钾素的主要来源。

表 2 不同施磷量的土壤养分平衡 kg/hm^2

处 理	养分总施入量			养分平衡		
	P_2O_5	N	K	P_2O_5	N	K
P_{00}	0	0	0	-18.06 c	-125.99 b	-136.08 a
P_{01}	85.02	270	0	-20.34 c	23.77 a	-194.05 ab
P_{02}	170.04	270	0	-32.63 d	17.62 a	-142.01 a
P_1	255.06	270	0	62.97 b	39.87 a	-143.03 a
P_2	510.12	270	0	148.93 ab	10.85 a	-210.43 b
P_4	1\ 020.24	270	0	321.59 a	8.73 a	-143.30 a

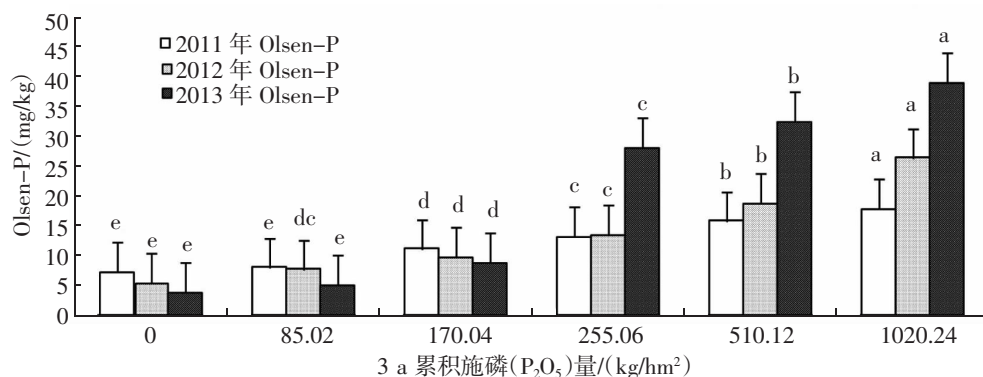


图 2 累积施磷量下的速效磷含量

以上分析说明,当投入的磷肥大于作物需磷量时,会加剧土壤磷残留量的增加,不仅造成磷资源的浪费,而且会污染环境,适量施磷量有利于土壤有效磷的平衡。从不同施磷量对土壤养分平衡值综合评估,干旱绿洲灌区春玉米磷素投入阈值为每年施磷(P_2O_5) 170.04 kg/hm^2 ,既不会影响土壤中养分的平衡,又对环境影响较小。

3 结论与讨论

施用磷肥增加了玉米籽粒产量,但玉米产量并不是随施磷量的增加而一直增高,而是随施磷量的增加,玉米产量表现为先增加而后呈下降趋势^[16-18]。本研究的结果与前人的研究结果一致,当年施磷量为 $P_2O_5\ 170.04\text{ kg/hm}^2$ 时的玉米产量显著高于其他处理,超过此值时籽粒产量略有降低。可见,适宜的磷肥用量可增加玉米的产量,而过量施磷抑制了养分向籽粒的运转,进而影响玉米产量的形成而造成减产。随着种植年限的增加,同一处理下玉米产量有下降的趋势,可能是由于过量施磷使得作物的呼吸旺盛,导致过早成熟,影响了作物的成熟度,造成减产。适宜施磷量是作物获得高产和环境友好发展的施肥点,再增加磷肥的施入只会增加磷肥损失量,不能使作物吸收利用的磷肥自农田通过各种损失途径进入环境,对环境造成污染。

作物的生长发育离不开对养分的吸收与转运,施用磷肥或增施磷肥都能显著地促进玉米地上部对磷素的吸收累积^[19]。赵靛等^[20]的研究表明,施用磷肥显著提高玉米磷素养分的积累,可以促进氮素向籽粒运转。吴启华等^[21]的研究认为,施磷量高的处理玉米总的吸磷量也高,但在高施磷量下分配到籽粒中的磷素逐年下降,这些结论与本研究一致。本研究中当施磷量在一定范围内($P_2O_5\ 0\sim 170.04\text{ kg/hm}^2$)增加时,玉米吸磷量增加,超过此量,作物的吸磷量降低。说明高施磷量使营养体生长过盛,玉米吸收的磷素

没有高效转移到籽粒中,造成对磷素的奢侈吸收。可见,适宜的磷素水平有利于养分向籽粒运转。随着种植年限的增加吸磷规律不同,施磷第1年随着施磷量的增加,玉米的吸磷量增加,而施磷第2年、第3年则随着施磷量的增加吸磷量先增加而后呈下降趋势,说明随着施磷量的累积,磷肥的综合效益在下降。

肥料的偏生产力和肥料利用率是衡量不同生产条件下合理施肥的重要指标,能很好地反映试验区土壤基础肥力和合理施肥的综合效应。磷肥施用量对肥料偏生产力和农学利用率均会产生显著影响。在本研究中,施磷量为 $P_2O_5\ 170.04\text{ kg/hm}^2$ 时磷肥偏生产力、农学利用率较高,而高于此值时则磷肥的偏生产力及农学利用率迅速下降,说明过量施磷使磷肥的增产效果在显著降低。随着施磷量的增加,磷肥的当季利用率、累积利用率均降低。最高施磷量($P_2O_5\ 340.08\text{ kg/hm}^2$)的当年磷肥利用率为 10.5% ,且随着施磷年限的增加,磷肥累积利用率仅为 0.8% ,显著降低了磷素的利用率。可见长期定位施磷使大量磷肥固定在土壤中,磷素当季利用率不高,造成土壤磷的累积,从而影响水环境安全。

磷肥施用量的高低可依据土壤有效磷含量来确定。孙克刚等^[22]的研究表明,当有效磷含量在 $6\sim 60\text{ mg/kg}$ 时,当地相应的磷肥推荐用量为 $P_2O_5\ 45\sim 105\text{ kg/hm}^2$ 。在本试验条件下,施磷显著增加土壤耕层的有效磷(Olsen-P)含量,施磷量越多,土壤有效磷积累量成倍增加。停施磷肥1a后,土壤耕层Olsen-P的含量仍然能够继续得到保持,说明上年施入土壤的磷肥有明显的累积作用,对后期作物有一定的贡献,应很好的利用累积的磷肥。

适宜的磷肥阈值有利于作物对土壤中磷的吸收、利用、减少累积,进而增加作物的产量。本试验条件下,当年施磷量(P_2O_5)为

170.04 kg/hm² 时, 产量为最高点, 此时磷肥的利用率最大。在每年施氮(N)270 kg/hm² 的条件下, 3 a 累积施磷量(P₂O₅)为 255.06 kg/hm², 即每年施磷量(P₂O₅)为 85.02 kg/hm² 时, 土壤中磷素略有盈余, 说明该施磷量能满足作物的需磷量。

从作物产量、利用率及环境安全综合考虑, 在干旱绿洲灌区土壤肥力条件下, 磷肥(P₂O₅)每年投入阈值为 85.02 ~ 170.04 kg/hm² 时, 可实现春玉米高产和对磷肥的高效利用。

参考文献:

- [1] 吴科生, 车宗贤, 卢秉林, 等. 地膜颜色和厚度对玉米生长及产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2020(5): 4-7.
- [2] 吴科生, 车宗贤, 张久东, 等. 有机无机复混肥在河西灌区小麦生产中的应用效果[J]. 甘肃农业科技, 2020(6): 9-11.
- [3] 吴科生, 车宗贤, 张久东, 等. 有机无机复混肥在河西绿洲灌区玉米生产中的应用效果初报[J]. 甘肃农业科技, 2020(7): 15-18.
- [4] 陆欣欣, 岳玉波, 赵 崢, 等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 394-400.
- [5] 董稳军, 黄 旭, 郑华平, 等. 广东省 60 年水稻肥料利用率综述[J]. 广东农业科学, 2012, 39(7): 76-79.
- [6] 谢亚萍, 闫志利, 李爱荣, 等. 施磷量对胡麻干物质积累及磷素利用效率的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(10): 1580-1587.
- [7] 刘艳玲, 刘昕报. 夏玉米磷肥利用率与土壤有效磷相关性研究[J]. 现代农业科技, 2015 (21): 29-32.
- [8] L S LAND. Chesapeake bay nutrient pollution: contribution from the land application of sewage sludge in Virginia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(11): 2305-2308.
- [9] HAILU G, NIGUSSIE D, ALI M, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiency in improved potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars in Southern Ethiopia[J]. American Journal of Potato Research, 2017, 94: 617-631.
- [10] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 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.
- [11] PLENET D, ETCHEBEST S, MOLLIER A, Pellerin s. growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency[J]. Plant and Soil, 2000, 223: 119-132.
- [12] 赵 伟, 宋 春, 周 攀, 等. 施磷量与施磷深度对玉米-大豆套作系统磷素利用率及磷流失风险的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1205-1214.
- [13] 张立花, 张 辉, 黄玉芳, 等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 801-809.
- [14] 赵亚丽, 杨春收, 王 群, 等. 磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4805-4813.
- [15] 吴 兵, 谢亚萍, 牛俊义, 等. 施磷对胡麻生长率和磷吸收利用率及其产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 114-119.
- [16] 侯云鹏, 杨 建, 孔丽丽, 等. 不同施磷水平对春玉米产量、养分吸收及转运的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 123-130.
- [17] 刘 凯, 张吉旺, 郭艳青, 等. 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.
- [18] 柴 颖, 赵 靛, 黄 婷, 等. 不同氮、磷配施对春玉米养分吸收和产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(3): 444-449; 454.
- [19] 景立权, 赵福成, 王德成, 等. 不同施氮水平对超高产夏玉米氮磷钾积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1478-1490.
- [20] 赵 靛, 侯振安, 李水仙, 等. 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.
- [21] 吴启华, 刘晓斌, 张淑香, 等. 施用常规磷水平的 80% 可实现玉米高产、磷素高效利用和土壤磷平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1468-1476.
- [22] 孙克刚, 李丙奇, 李潮海, 等. 砂姜黑土区玉米田土壤有效磷施肥指标及施磷推荐(基于ASI法的土壤养分丰缺指标)[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 167-171.

(本文责编: 郑立龙)