

液体磷肥用量对玉米生长·产量及品质的影响

陈煜林¹, 胡义熬¹, 杨永胜², 杨依凡^{1,3}, 涂攀峰⁴, 薛鑫海¹, 郑宇程¹, 邓兰生^{1*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; 2. 内蒙古乌拉特前旗农业技术推广中心, 内蒙古乌拉特前旗 014400; 3. 东莞一翔液体肥料有限公司, 广东东莞 523135; 4. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东广州 510225)

摘要 在田间液体配肥站模式下, 根据玉米的养分需求规律, 探究液体肥料全部追施时砂壤土玉米适宜的液体磷肥投入量。在田间设置了3个等级的磷投入量, 纯磷投入量分别为 15.0 kg/hm² (MP1)、29.4 kg/hm² (MP2)、58.2 kg/hm² (MP3), 研究了不同液体磷肥投入量对玉米农艺性状、磷素吸收、产量及玉米籽粒品质的影响。结果表明, MP3的产量、穗数和穗粗均最高; 与MP1相比, MP3的光合色素(叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素)显著增加了21.82%~37.76%; 不同生育期MP3干物质重的增加幅度为14.59%~39.09%; 此外, MP3的籽粒含糖量最高, MP2的籽粒脯氨酸和蛋白质含量最高。当纯磷投入量为58.2 kg/hm²时, 有利于提高玉米的产量、干物质积累、叶绿素含量和籽粒含糖量; 当纯磷投入量为29.4 kg/hm²时, 有利于提高籽粒的脯氨酸和蛋白质含量; 当纯磷投入量为15.0 kg/hm²时, 磷肥偏生产力最高。

关键词 液体配肥站; 滴灌; 液体磷肥; 玉米; 追施; 生长发育

中图分类号 S513 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)10-0129-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.10.029



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effect of Liquid Phosphate Fertilizer on Growth, Yield and Quality of Maize

CHEN Yu-lin¹, HU Yi-ao¹, YANG Yong-sheng² et al (1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642; 2. Agricultural Technology Extension Center of Urat Front Banner, Inner Mongolia, Urat Front Banner, Inner Mongolia 014400)

Abstract Under the mode of liquid fertilizer station in the field, according to the nutrient demand law of maize, the suitable liquid phosphorus fertilizer input for maize in sandy loam soil was explored when all liquid fertilizers were applied. Three levels of phosphorus input were set up in the field. The pure phosphorus input was 15.0 kg/hm² (MP1), 29.4 kg/hm² (MP2) and 58.2 kg/hm² (MP3), respectively. The effects of different liquid phosphorus input on agronomic traits, phosphorus absorption, yield and grain quality of maize were studied. The yield, panicle number and panicle diameter of MP3 were the highest; compared with MP1, the photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoids) of MP3 were significantly increased by 21.82%~37.76%; the increase of dry matter weight of MP3 at different growth stages was 14.59%~39.09%; in addition, the sugar content of MP3 was the highest, and the proline and protein content of MP2 was the highest. The yield, dry matter accumulation, chlorophyll content and grain sugar content of maize were improved when the pure phosphorus input was 58.2 kg/hm²; the proline and protein content of maize were improved when the pure phosphorus input was 29.4 kg/hm²; when the pure phosphorus input was 15.0 kg/hm², the partial factor productivity of applied P was the highest.

Key words Liquid fertilizer station; Drip irrigation; Liquid phosphate fertilizer; Corn; Topdressing; Growth and development

玉米是禾本科一年生草本植物, 是我国重要的粮食作物之一。与传统的水稻、小麦等粮食作物相比, 玉米具有较强的耐旱性、耐寒性和良好的环境适应性^[1]。玉米营养价值高, 是我国高产粮食作物, 是畜牧业、水产养殖业等的重要饲料来源, 也是食品、保健品、轻工、化工等不可缺少的原料之一, 玉米资源丰富、价廉、易得, 还具有多种生物活性, 如抗氧化、抗肿瘤、降血糖、提高免疫力、抗菌杀菌等, 具有广阔的发展和应用前景。而磷作为植物的必需元素之一, 不仅是植物中许多重要化合物的组成部分, 还以多种方式参与植物的代谢过程, 从而影响植物的生长发育^[2]。磷肥也是3种最重要的农业肥料之一, 在农业生产中发挥重要作用^[3], 但磷肥往往作为基肥进行施用, 磷肥利用率一般只有10%~25%。提高磷肥的利用率, 不仅可以减少种植玉米的投入成本, 增加产出, 而且也是保障我国有限磷肥资源的重要措施, 对保障我国粮食安全具有重要意义^[4]。磷酸一铵与传统磷肥过磷酸钙相比, 其具有优良的水溶性, 可以很好地应用于田间水

肥一体化灌溉设施中, 对提高磷肥利用率具有重要意义, 也是田间液体配肥站磷源的主要选择之一。北方土壤多为碱性土壤, 而磷酸一铵作为酸性肥料, 有利于作物生长发育, 土壤中磷酸一铵的NH₄⁺比其他铵盐更容易被土壤吸收, 因为在中性条件下容易解离, 形成的NH₄⁺被土壤胶体(负电荷)吸收, 形成的H₂PO₄⁻也是作物可以吸收和利用的形式^[5]。此外, 与铵离子共存的磷离子特别容易被作物根系吸收^[6]。张皓禹等^[7]研究表明, 新疆北疆当地磷肥以25%作基肥, 75%作追肥最有利于玉米生长。相比磷肥作为基肥施用, 磷肥通过滴灌的追施可以显著提高磷肥利用率、磷素积累量和磷肥偏生产力^[8]。此外, 滴施液体肥可以提高玉米氮磷钾的积累量, 最终提高其产量及品质^[9]。水肥一体化设施在我国农业上大面积推广应用, 但在实际生产应用中, 并未很好地发挥水肥一体化设施的优势, 而且以往的研究主要揭示玉米对磷的吸收机理、磷肥利用率等方面^[10]的内容; 而且大多数研究虽然应用了水肥一体化设施, 但磷还是主要作为基肥施用, 追肥所占比例较少, 而这不能发挥水肥一体化条件下磷素的高效利用^[11]。因此, 笔者以磷酸一铵作为磷原料, 通过田间液体配肥站, 配制3个不同磷含量的配方肥, 并以不施底肥、全程追肥的方式, 探讨不同液体磷肥用量对玉米生长、

基金项目 国家重点研发计划项目(2016YFD0200404); 东莞市引进创新创业领军人才计划项目(东人函[2018]736号)。

作者简介 陈煜林(1997—), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 研究方向: 水肥一体化技术和新型肥料。*通信作者, 副教授, 从事作物营养与灌溉施肥教学、研究和推广应用工作。

收稿日期 2021-06-30; **修回日期** 2021-07-21

产量及品质的影响,旨在为玉米生产中液体磷肥合理施用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于2019年5—9月在内蒙古自治区巴彦淖尔乌拉特前旗大余太镇马卜子村(108°58′33.54″E, 41°06′5.43″N)进行。该区属温带大陆性气候,平均海拔1 100 m,年降雨量220 mm,年蒸发量2 500 mm,年日照时数3 002.5 h,其中4—9月1 733.6 h,初霜在9月中旬,终霜在5月中旬,霜期120 d。土壤为砂壤土,有机质为7.11 g/kg,速效氮26.30 mg/kg,速效磷5.35 mg/kg,速效钾84.30 mg/kg,土壤pH为7.77,EC值为0.44 mS/cm。

1.2 试验材料 供试玉米品种为MC670,氮肥用尿素硝酸铵溶液(N 28%),磷肥用磷酸一铵(N 12%, P₂O₅ 61%),钾肥用氯化钾(K₂O 60%)。

1.3 试验设计 试验不施基肥,全程通过田间液体配肥站配制的液体配方肥进行追施,根据磷投入量的不同,共设置MP1(纯磷投入量为15.0 kg/hm²)、MP2(纯磷投入量为29.4 kg/hm²)、MP3(纯磷投入量为58.2 kg/hm²)3个处理,每个处理3次重复,共9个小区,每个小区面积500 m²,随机区组排列。各处理的纯氮投入量均为220.5 kg/hm²,纯钾投入量均为48.0 kg/hm²,整个生育期共施肥8次,具体施肥情况见表1。

于2019年5月12日进行播种,前茬作物为玉米,宽行75 cm,窄行40 cm,株距23 cm,理论密度为75 645株/hm²,出苗率为91%。灌溉方式采用膜下滴灌,在前8次滴水时将8次肥带下,总灌水量4 078.5 m³/hm²。其他农艺措施,如病虫害管理和杂草控制,按照该省建议的指导方针和标准,在所有处理中都是相同的。

表1 玉米生育期肥料投入分配情况

Table 1 Distribution of fertilizer input in maize growth period

生育时期 Growth stage	施肥日期 Fertilization date	N	P ₂ O ₅			K ₂ O
			MP1	MP2	MP3	
苗期 Seedling stage	05-27	20.25	2.70	4.05	8.10	4.50
	06-08	20.25	2.70	4.05	8.10	4.50
穗期 Ear stage	06-17	30.00	1.92	3.96	7.80	7.20
	06-28	30.00	1.92	3.96	7.80	7.20
	07-06	30.00	1.92	3.96	7.80	7.20
	07-15	30.00	1.92	3.96	7.80	7.20
花粒期 Kernel-filling stage	07-24	30.00	1.92	3.96	7.80	7.20
	08-04	30.00	0.00	1.50	3.00	3.00

1.4 测定项目与方法 在苗期(播种后38 d)、穗期(播种后58 d)和花粒期(播种后85 d)于田间测定株高、茎粗,每个小区取植株3株,将各器官分开后,105℃杀青30 min后,75℃烘干至恒重,测定植株地上部生物量。而后粉碎过2 mm筛,通过钼锑抗比色法测定各器官含磷量,并计算磷肥偏生产力^[12](计算公式为PFPP=Y/PF,其中,PFPP为磷肥偏生产力,Y为施肥后获得的作物产量,PF为磷肥的投入量)。在成熟期(播种后126 d)进行田间调查,测定产量以及收获后室内考种,测定穗长、穗粗和百粒重等指标,并通过近红外谷

物分析仪测定玉米籽粒的蛋白质含量、含油量、淀粉含量。可溶性糖测定采用蒽酮法;游离脯氨酸含量测定采用茚基水杨酸法^[13]。总叶绿素、叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量参考He等^[14]的方法检测。将磨碎的叶样品(约0.1 g)与95%无水乙醇一起放置,然后在黑暗中保持直到样品变白。在紫外可见分光光度计上分别在645、652和663 nm处测定叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量。

1.5 数据处理 数据使用Microsoft Office Excel 2016进行处理,采用软件Statistix 8.1进行方差分析和多重比较,多重比较采用LSD法,结果采用字母标记法标记。作图通过Sigma Plot 14.0进行。

2 结果与分析

2.1 液体磷肥施用量对玉米地上部生长的影响 由表2可知,不同时期施用不同量的液体磷肥对玉米生长发育有一定的影响。在苗期,MP2和MP3均显著提高了株高、茎粗和地上部生物量;在穗期,MP3的株高和地上部生物量均显著高于MP1,而茎粗在3个处理间差异不显著;在花粒期,MP2和MP3的茎粗和地上部生物量均高于MP1,但3个处理的株高和茎粗差异不显著,MP3处理的地上部生物量显著高于MP1和MP2处理;成熟期,MP3处理的株高和地上部生物量高于MP1和MP2处理,3个处理的株高和茎粗差异不显著,MP2和MP3处理的地上部生物量均显著高于MP1处理。

表2 不同时期液体磷肥不同投入量对玉米株高、茎粗及地上部生物量的影响

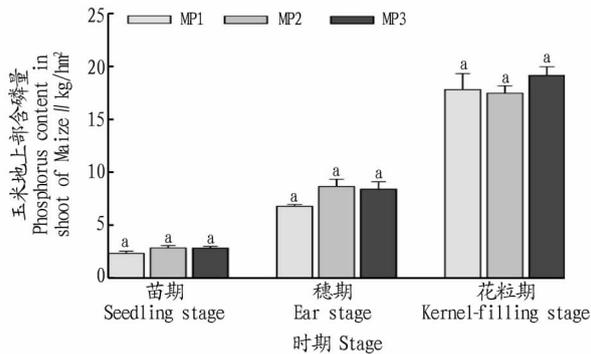
Table 2 Effects of different application rates of liquid phosphorus fertilizer on plant height, stem diameter and above-ground biomass of maize in different periods

生长阶段 Growth stage	处理 Treatment	株高 Plant height cm	茎粗 Stem diameter mm	地上部生物量 Above-ground biomass g/株
苗期 Seedling stage	MP1	83.30±1.03 b	24.01±0.27 b	11.24±0.75 c
	MP2	89.95±0.64 a	26.07±0.41 a	13.90±0.56 b
	MP3	91.25±1.26 a	25.00±0.36 a	15.63±1.08 a
穗期 Ear stage	MP1	225.63±1.37 b	28.93±0.61 a	78.49±3.37 b
	MP2	224.85±2.39 b	28.60±0.58 a	85.79±4.74 ab
	MP3	231.06±1.47 a	29.89±0.66 a	89.95±2.60 a
花粒期 Kernel-filling stage	MP1	319.95±2.57 a	25.16±0.58 a	108.37±3.19 b
	MP2	325.30±2.36 a	25.44±0.46 a	112.99±2.62 b
	MP3	317.84±1.59 a	26.62±0.76 a	127.54±2.46 a
成熟期 Maturity stage	MP1	281.53±7.07 a	23.91±0.10 a	296.48±4.25 b
	MP2	303.88±13.56 a	24.72±0.04 a	323.29±3.05 a
	MP3	315.17±9.37 a	23.63±0.04 a	324.44±5.15 a

注:同一生长阶段同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column at the same growth stage indicated significant difference between different treatments ($P < 0.05$)

2.2 液体磷肥施用量对玉米磷素吸收的影响 液体磷肥不同施用量对玉米植株地上部磷的累积存在一定的影响,但影响不显著(图1)。在不同生育时期,玉米植株地上部生物量随液体磷肥施用量的增加而增加,MP3处理的含磷量始终高于MP1处理,但二者之间不存在显著差异。



注:同一时期柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters on the column at the same growth stage indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

图1 不同时期液体磷肥不同施用量对玉米植株地上部磷积累的影响

Fig.1 Effects of different application rates of liquid phosphorus fertilizer on the accumulation of phosphorus in maize shoot at different stages

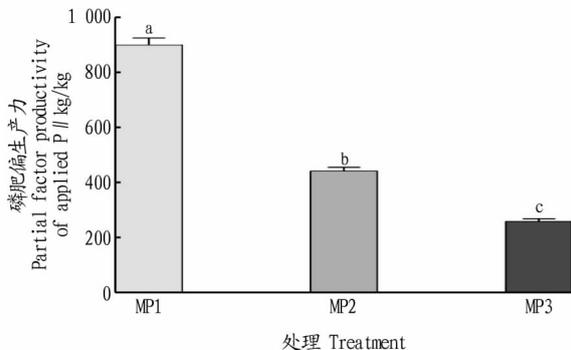
表3 液体磷肥不同施用量下玉米产量及其相关指标

Table 3 Corn yield and related indexes under different application rates of liquid phosphorus fertilizer

处理 Treatment	产量 Yield//t/hm ²	百粒重 100-kernel weight//g	穗数 Ear number ×10 ⁴ /hm ²	穗粒数 Kernels number	穗长 Ear length cm	穗粗 Ear diameter cm
MP1	13.49±0.38 b	32.89±0.79 b	6.79±0.13 a	569.86±23.01 b	22.45±0.35 a	5.40±0.04 b
MP2	12.99±0.39 b	37.19±0.77 a	6.40±0.22 a	548.90±26.49 b	22.35±0.48 a	5.37±0.01 b
MP3	15.08±0.56 a	35.78±0.61 ab	7.19±0.29 a	600.05±21.08 a	22.33±0.32 a	5.54±0.01 a

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

图2 液体磷肥施用量对玉米磷肥偏生产力的影响

Fig.2 Effect of liquid phosphate fertilizer application rate on partial factor productivity of applied P of corn

穗期和花粒期,MP3处理的叶绿素a含量分别比MP1显著增加32.53%、37.07%和21.82%;在苗期、穗期和花粒期,MP3处理的叶绿素b含量分别比MP1处理高33.05%、37.76%和23.10%;在类胡萝卜素含量方面,MP3处理在苗期、穗期和花粒期分别比MP1处理高27.07%、32.91%和27.81%;在总叶绿素含量方面,MP3处理比MP1处理在苗期、穗期和花粒期分别高32.71%、37.32%和22.29%。MP1和MP2的叶绿素a、

2.3 液体磷肥施用量对玉米产量及相关指标的影响 不同施用量的液体磷肥对玉米产量形成有显著影响(表3)。MP3的产量显著高于MP1和MP2,MP1与MP2间无显著差异。在穗粒数和穗粗方面也表现出类似的趋势。因此,推测是由于液体磷肥施用量的增加可以促进穗粗的增粗,而在穗粗增粗的情况下,穗轴表面积增大,有利于结更多的籽粒,从而提高穗粒数,最终提高产量。玉米籽粒百粒重MP1最低,为32.89 g,MP2显著高于MP1,为37.19 g,在3个处理中最高,MP3为35.78 g,处于二者之间,但与MP1和MP2均不存在显著差异。在穗数、穗长方面,3个处理之间差异不显著。磷肥偏生产力是指单位面积的作物产量与单位面积所投入的磷肥纯养分的比例。虽然随着液体磷肥施用量的增加,玉米产量也显著增加,但玉米产量的增加幅度并没有液体磷肥施用量的增加幅度大,因此MP1的磷肥偏生产力最高,显著高于MP2和MP3处理(图2)。

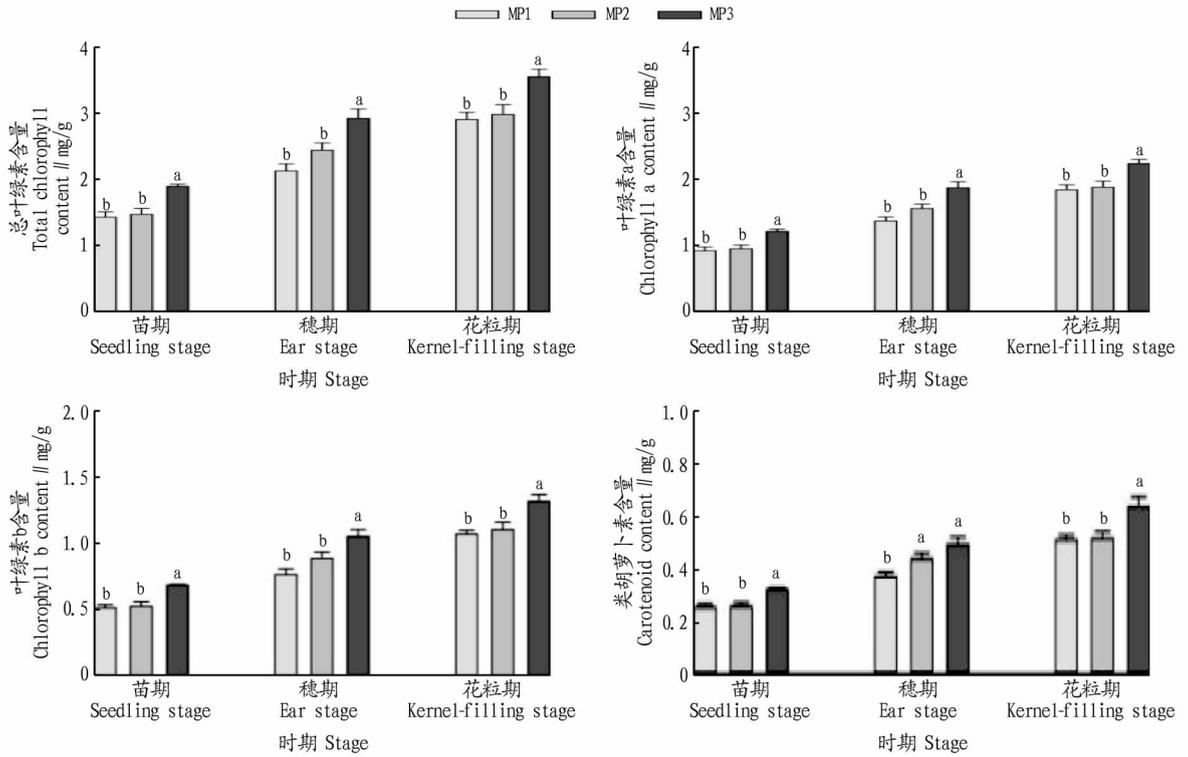
2.4 液体磷肥施用量对玉米叶绿素含量的影响 不同施用量的液体磷肥对玉米叶绿素含量的影响不同(图3)。在苗期、

叶绿素b、类胡萝卜素(穗期除外)和总叶绿素含量在各时期差异不显著。

2.5 液体磷肥施用量对玉米籽粒品质的影响 由图4可知,不同施用量的液体磷肥对玉米籽粒品质的影响不同。与MP1相比,MP2和MP3显著提高了籽粒游离脯氨酸含量,分别提高了18.60%和8.89%;在籽粒可溶性蛋白含量方面,MP1和MP3差异不显著,MP2的蛋白质含量显著高于MP1和MP3;在籽粒可溶性糖含量方面,MP1和MP2之间差异不显著,MP3含量最高。3个处理间籽粒含油量和籽粒淀粉含量均不存在显著差异。

3 结论与讨论

该试验研究了不同用量的磷酸一铵以液体肥的形式进行多次追施对玉米生长和产量形成的影响。结果表明,液体磷肥施用量对玉米产量有显著影响。在所有处理中,磷投入量为58.2 kg/hm²的MP3处理的产量最高,主要是由于粒重、粒数和穗粗较高。Van Der Eijk等^[15]也进行了类似的研究,结果表明磷对玉米产量能产生很好的效果,尤其是在缺磷土壤上。早期研究表明,磷肥用量对玉米产量形成有显著影响^[16]。在此基础上,玉米产量的增加可以用于物质积累的增加来解释,尤其是苗期。结果表明,玉米苗期干物质重随液体磷肥施用量的增加而增加。产量与苗期生长状况呈显著正相关,苗期磷营养需求对玉米产量形成有显著影响^[17]。

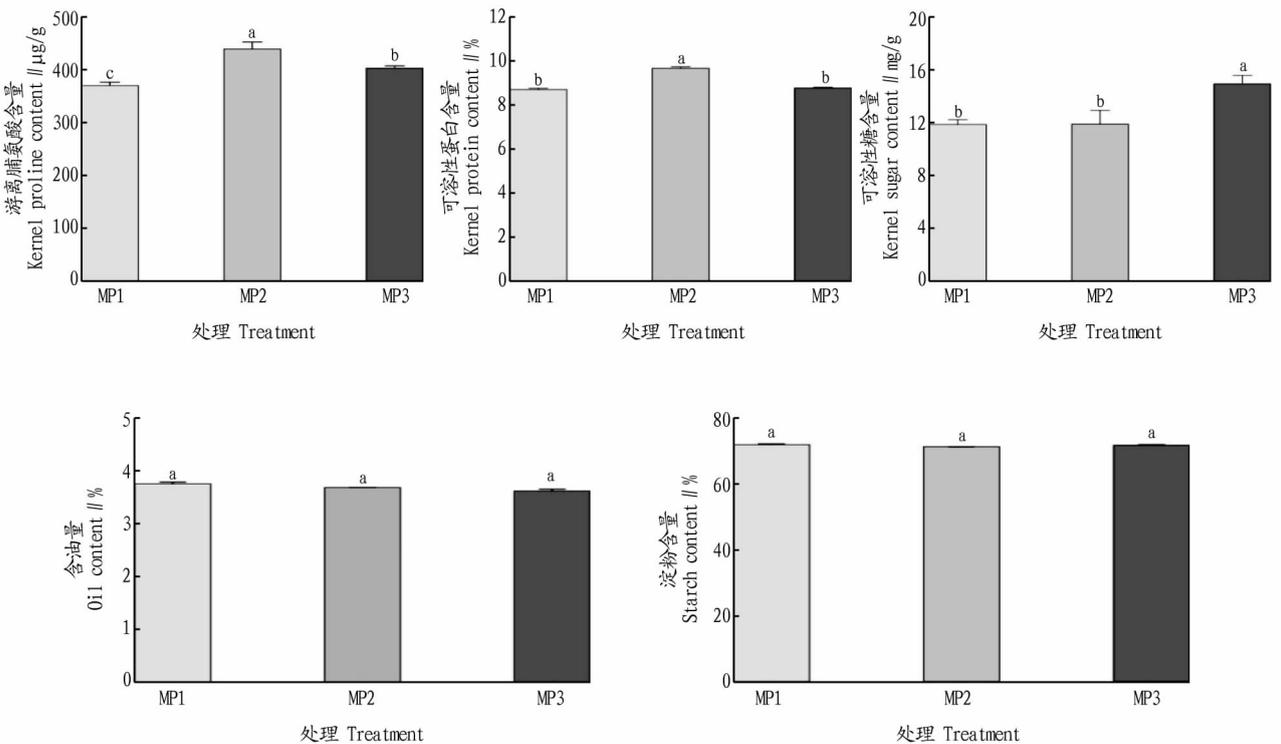


注:同一时期柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters on the column at the same growth stage indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

图 3 液体磷肥不同施用量对玉米叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of different application rates of liquid phosphorus fertilizer on chlorophyll content of maize



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

图 4 液体磷肥不同施用量对玉米籽粒品质的影响

Fig.4 Effects of different application rates of liquid phosphorus fertilizer on maize grain quality

Zhu 等^[18]研究表明,幼苗根系对磷的吸收显著影响玉米幼苗的生长发育。此外,SacaLa 等^[19]指出,磷水平会诱导玉米幼苗对盐胁迫的抗性调节。此外还观察到,增加磷酸一铵溶液追施的用量会增加叶绿素含量,这可能是玉米产量形成差异的原因之一。叶绿体是植物和其他光合作用生物进行光合作用的场所,因此叶绿素含量将直接影响光合作用的强度^[20]。该研究结果表明,液体磷肥的施用量可能通过影响叶绿素的生物合成来影响光合作用,调节玉米产量的形成。

研究表明不同施用量的磷酸一铵溶液追施会影响玉米的某些品质特性。在 3 个不同施用量的处理中,磷投入量为 29.4 kg/hm² MP2 处理的营养价值最高,因为蛋白质和脯氨酸含量最高^[21-22],而液体磷肥施用量最高的 MP3 处理会产生甜度更高的籽粒,因为 MP3 处理的籽粒可溶性糖含量在 3 个处理中最高。结合籽粒品质和产量表现,当液体磷肥纯投入量为 15.0 kg/hm² 时,磷肥偏生产力最高;当液体磷肥纯投入量为 29.4 kg/hm² 时,玉米籽粒的品质更佳;当液体磷肥纯投入量为 58.2 kg/hm² 时,玉米产量最高,玉米籽粒的甜度也更佳。所以,在实际生产过程中,通过不施底肥全程液体追肥的方式,调节磷的投入量,可以获得不同的田间效果;可以投入较少(15.0 kg/hm²)的磷素营养获得较高的产量,做到最大程度地利用磷,从而减少磷的浪费,但并不建议长期投入较少的磷肥,使土壤缺磷,另外研究表明,施磷量过高或过低都不利于植物根系和土壤微生物等的正常生命活动^[23];如果在生产实践中追求更高的玉米品质,可以适当加大磷肥投入量;如果追求更高的产量或者甜度,可以继续加大磷肥的投入量。在实际生产过程中,建议根据目标需求选择合适的磷肥施用量,可以在获得预期目标的同时,高效地利用磷肥,减少资源的浪费,获得更好的收益。

参考文献

- [1] ZHOU L M, LI F M, JIN S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China [J]. *Field crops research*, 2009, 113 (1): 41-47.
- [2] GHOSH P, RATHINASABAPATHI B, MA L Q. Phosphorus solubilization and plant growth enhancement by arsenic-resistant bacteria [J]. *Chemosphere*, 2015, 134: 1-6.
- [3] VAN GEEL M, DE BEENHOUWER M, CEULEMANS T, et al. Application of slow-release phosphorus fertilizers increases arbuscular mycorrhizal fungal diversity in the roots of apple trees [J]. *Plant & soil*, 2016, 402(1/2): 291-301.
- [4] 黄青青, 刘星, 张倩, 等. 磷肥中镉的环境风险及生物有效性分析 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(2): 156-161.
- [5] CHEN Y L, CHEN X J, ZHANG C L, et al. Conversion of ammonium polyphosphate (APP) in acidic soil and its effect on soil phosphorus availability [J]. *Applied ecology and environmental research*, 2020, 18(3): 4405-4415.
- [6] LIU H W, DONG Y H, WANG H Y, et al. Ammonium adsorption from aqueous solutions by strawberry leaf powder: Equilibrium, kinetics and effects of coexisting ions [J]. *Desalination*, 2010, 263(1/2/3): 70-75.
- [7] 张皓禹, 孟超然, 张凤麟, 等. 新疆北疆地区磷肥不同基追比例对滴灌玉米养分吸收和产量的影响 [J]. *玉米科学*, 2021, 29(1): 138-145.
- [8] 黄金鑫, 曹国军, 耿玉辉, 等. 膜下滴灌水肥一体化玉米产量及磷素吸收利用效应研究 [J/OL]. *吉林农业大学学报*, 2020-12-10 [2021-03-14]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.5091>.
- [9] 邓兰生, 涂攀峰, 叶倩倩, 等. 滴施液体肥对甜玉米生长、产量及品质的影响 [J]. *玉米科学*, 2012, 20(1): 119-122, 127.
- [10] 张国桥, 王静, 刘涛, 等. 水肥一体化施磷对滴灌玉米产量、磷素营养及磷肥利用效率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1103-1109.
- [11] 戚昕元, 曹国军, 耿玉辉, 等. 滴灌磷肥分配比例对玉米磷素吸收利用的影响 [J/OL]. *吉林农业大学学报*, 2020-06-08 [2021-03-14]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.5684>.
- [12] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [13] 罗昊文, 孔雷蕾, 钟卓君, 等. 淹水胁迫对水稻玉香油占秧苗生长和生理特性的影响 [J]. *作物杂志*, 2017(1): 135-139.
- [14] HE L X, ZHENG A X, DU B, et al. Low-concentration sodium selenite applications improve oxidation resistance of filling-stage rice [J]. *Applied ecology and environmental research*, 2019, 17(1): 989-998.
- [15] VAN DER EIJK D, JANSSEN B H, OENEMA O. Initial and residual effects of fertilizer phosphorus on soil phosphorus and maize yields on phosphorus fixing soils. A case study in south-west Kenya [J]. *Agriculture ecosystems & environment*, 2006, 116(1/2): 104-120.
- [16] GUAN Y, SONG C, GAN Y T, et al. Increased maize yield using slow-release attapulgite-coated fertilizers [J]. *Agronomy for sustainable development*, 2014, 34(3): 657-665.
- [17] 官利兰, 陈锐铭, 程凤娟, 等. 磷施用量对红壤中玉米生长的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(25): 34-36.
- [18] ZHU J M, LYNCH J P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays*) seedlings [J]. *Functional plant biology*, 2004, 31(10): 949-958.
- [19] SACAŁA E, DEMCZUK A, GRZYŚ E. The response of maize seedlings to salt stress under increasing levels of phosphorus [J]. *Journal of elementology*, 2016, 21(1): 185-194.
- [20] CHEN Y E, SU Y Q, ZHANG C M, et al. Comparison of photosynthetic characteristics and antioxidant systems in different wheat strains [J]. *Journal of plant growth regulation*, 2018, 37(2): 347-359.
- [21] XIE W J, KONG L L, MA L, et al. Enhancement of 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) concentration, total yield, and quality in fragrant rice through exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) application [J/OL]. *Journal of cereal science*, 2020, 91 [2021-03-14]. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102900>.
- [22] LUO H W, HE L X, DU B, et al. Foliar application of selenium (Se) at heading stage induces regulation of photosynthesis, yield formation, and quality characteristics in fragrant rice [J]. *Photosynthetica*, 2019, 57(4): 1007-1014.
- [23] 尚华翠, 杨柳明, 李一清. 磷肥施用对土壤呼吸及其组分影响的研究进展 [J]. *福建农业科技*, 2020(7): 6-14.