



梁建芬,汪小芳,刘天仪,程凌云,王悦力. 田间磷肥管理对玉米产能和功能营养成分的影响[J]. 中国农业大学学报,2025,30(09):27-36.
LIANG Jianfen, WANG Xiaofang, LIU Tianyi, CHENG Lingyun, WANG Yueli. Effects of field phosphate fertilizer management on the energy-yielding and functional nutrients of maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(09): 27-36.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.03

田间磷肥管理对玉米产能和功能营养成分的影响

梁建芬¹ 汪小芳¹ 刘天仪¹ 程凌云² 王悦力³

(1. 中国农业大学 食品科学与营养工程学院/植物源功能食品北京市重点实验室,北京 100083;

2. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;

3. 中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘要 为明确玉米田间磷肥管理对玉米营养成分的影响规律,实现精准施磷提升玉米营养价值的目标,以“玉米”“营养成分”“磷肥”“生理代谢”为关键词,检索 Web of Science, Scopus 和知网等数据库,共获得 70 篇相关文献,对施磷量、施磷方式及时期、磷肥种类对玉米产能和功能营养成分的含量、组成的影响进行了梳理,并简要总结了其作用机制。结果表明:适宜的田间磷肥管理,如优化施磷量、时期、配施有机肥等能增加淀粉、人体必需氨基酸、不饱和脂肪酸及类胡萝卜素、生育酚和微量矿物质元素等功能营养成分的含量;磷肥利用效率受玉米品种、土壤及环境的影响,过量或不足施磷均可能导致营养品质下降;磷肥管理影响玉米营养品质是通过玉米植株的根系对磷的吸收和转运,以及磷在碳水化合物、氨基酸和脂质合成和代谢等途径中发挥促进关键酶的表达或作为关键的调控因子等作用实现的。综上,已有磷肥管理对玉米营养品质影响的相关研究主要集中在植物营养和农学领域,未来应结合食品科学与营养等领域,进行跨学科深入研究,进一步探究磷肥影响玉米营养成分合成和代谢的分子机制,揭示磷肥-环境-玉米营养之间的相互作用,优化施磷策略,从而提升玉米营养价值。

关键词 玉米; 产能营养成分; 功能营养成分; 磷肥管理; 生理代谢; 调控机制

中图分类号 S513 文章编号 1007-4333(2025)09-0027-10 文献标志码 A

Effects of field phosphate fertilizer management on the energy-yielding and functional nutrients of maize

LIANG Jianfen¹, WANG Xiaofang¹, LIU Tianyi¹, CHENG Lingyun², WANG Yueli³

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering/Beijing Key Laboratory of Functional Food from Plant Resources, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract This study aimed to improve nutritional value of maize by precise fertilization management and identify the effects of phosphate (P) fertilizer. Taking “corn”, “nutritional composition” “phosphorus fertilizer” and “physiological metabolism” as keywords, a total of 70 relevant articles were retrieved from databases including Web of Science, Scopus and CNKI. The effects of application rates, placement methods, the types of fertilizing and timing of fertilization on contents and composition of energy-yielding and functional nutrients were reviewed. The regulatory mechanisms were summarized briefly. The results show that: 1) Proper phosphate fertilizer

application increases starch, essential amino acids, unsaturated fatty acids and functional components like carotenoid, tocopherol and micro minerals; 2) The efficiency of P fertilizer is affected by varieties of maize, properties of soil, environment and so on, and the overuse or lack of P fertilizer lower the nutritional value of maize kernel; 3) The mechanisms involve phosphorus acquisition and translocation by roots, and P functions as part of essential enzymes participated in the synthesis and metabolites pathways of carbohydrate, amino acids and fatty acids. To summarize, research on P fertilization and nutritional values of maize is mainly in the field of plant nutrition and agronomy. Further studies should be explored by integrating food science and nutritional in the future to study the molecular mechanisms of P fertilizer management on nutrient synthesis, build the “phosphate fertilizer-environment-maize nutrition” model, and raise the nutritional value.

Keywords maize; energy-yielding nutrients; functional nutrients; phosphate fertilizer management; physiological metabolism; regulatory mechanism

玉米(*Zea mays* L.)是我国重要的粮食作物,2023年我国玉米产量达2 890万t^[1]。玉米籽粒富含淀粉、蛋白质、脂肪等经人体吸收代谢可提供能量的产能营养成分,也含有类胡萝卜素、生育酚等具有抗氧化、抗炎、抗衰老等重要生理作用的功能营养成分^[2-4],这些营养成分的含量及组成对优化膳食结构及提升玉米作为加工原料的品质有重要意义。

已有研究显示,通过营养强化,玉米可解决膳食必需氨基酸、维生素等营养缺乏问题^[5-6]。而玉米籽粒中营养成分的合成与积累,其物质基础和代谢会受到矿物质营养的影响^[7]。众多的矿质元素中,磷(P)是主要限制性元素之一,其在玉米生长中可发挥如作为磷脂、核酸和磷酸代谢物中间体的主要组成成分和提供能量等多种生理作用^[8]。在实际的玉米生产中,通过施用磷肥来补充土壤中有有效磷,采用何种肥料、如何施用、何时施肥等田间磷肥管理会直接影响玉米对磷的吸收和利用,进而影响玉米籽粒中营养成分的积累^[9]。

目前的研究主要从农学、园艺及植物营养学角度出发,探究磷肥管理对玉米生长发育、产量等农艺性状方面的影响。而涉及玉米作为食品原料食用的最终价值,基于食品营养角度出发去分析和研究田间磷肥管理的研究鲜见报道。因此本研究拟从玉米作为粮食作物的角度出发,在Web of science, Scopus和知网等数据库检索,获取相关文献,分析籽粒中淀粉、蛋白质、脂肪等供能营养成分的含量和组成受磷肥管理的影响情况;并涉及类胡萝卜素、生育酚等玉米籽粒中含量较高的功能性成分与磷肥管理的相关性分析,归纳和对比分析不同品种和不同土壤、种植环境下磷肥管理对玉米产能和功能营养成分的影响,旨在明确田间磷肥管理对

玉米营养成分的影响规律,实现精准施磷来提升玉米营养价值的目标,以期优化玉米生产的田间磷肥管理策略提供支持。

1 文献来源

在Web of Science, Scopus和知网等数据库,以“玉米”“营养成分”“磷肥”“生理代谢”为关键词进行检索,共获取田间磷肥管理影响玉米产能和功能营养成分的相关文献70篇。

2 磷肥对玉米产能营养成分的影响

2.1 淀粉

玉米籽粒中淀粉含量为60~75 g/100 g(干重,下同),是主要的能量储存形式,依据结构差异,可分为支链淀粉(70~75 g/100 g)和直链淀粉(25~30 g/100 g),二者的含量和比例会影响淀粉性质,进而影响人体的消化和吸收^[10]。玉米淀粉不仅是食品工业的重要原料,也被广泛应用于纺织、造纸、生物燃料等领域^[11]。施磷量、施磷方式和施用时期会影响玉米淀粉的含量、组成和淀粉颗粒大小,具体影响因品种、土壤性质、种植区域以及所采用的农艺措施而异^[12-17](表1)。

玉米籽粒中淀粉的含量会受到田间施磷量和施磷方式的影响,影响程度会因玉米品种、种植土壤和天气条件而不同,增施相同用量的磷肥可使普通玉米籽粒的淀粉含量显著增加,而高油玉米籽粒中淀粉含量则会降低^[12-14]。同一玉米品种,在不同的施肥方式、土壤性质、天气条件等因素影响下,即使施磷量相同,籽粒的淀粉含量也不同。以‘郑单958’为例,在中国农业大学曲周实验站用基肥形式施磷,施磷量从0增加至100 kg/hm²,淀粉含量增加了14%,变化显著^[12];当在安徽科技大学凤阳实验

表 1 不同磷肥管理对玉米籽粒中淀粉含量、组成及颗粒大小的影响

Table 1 Effect of phosphate fertilizer on the content, composition and particle size of starch in maize grains

玉米品种 Corn cultivar	磷肥管理 P management	淀粉含量组成及颗粒大小 Content, composition and particle size of starch	文献 Reference
郑单 958	增施 100 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	含量由 68 g/100 g 增加至 78 g/100 g。	[12]
	施磷量分别为 60 kg/hm ² 和 180 kg/hm ² , 基肥。	含量由 71 g/100 g 增加至 73 g/100 g。	[13]
高油 1 号	增施 90 kg/hm ² KH ₂ PO ₄ , 基肥。	直链淀粉含量先由 11.39 g/100 g 降低至 11.12 g/100 g, 后增加至 11.19 g/100 g。	[14]
中单 909	施磷从 60 kg/hm ² 增施至 120 kg/hm ² , 基肥。	直径≤18 μm 的淀粉颗粒占比由 69.63% 减少至 65.90%, 而直径>18 μm 的淀粉颗粒占比由 30.37% 增加至 34.00%。	[15]
PMH-1 (高产杂交)	50 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O, 基肥; 接种磷溶解菌和丛枝菌根真菌, 结合叶面喷施 2% (w/V) NH ₄ HPO ₄ 。	支链淀粉含量由 81.5 g/100 g 降低至 76.0 g/100 g。	[16]
苏玉糯	玉米生长六叶期施用缓释肥 (N, P ₂ O ₅ , K ₂ O 分别为 225, 75, 75 kg/hm ²)。	淀粉颗粒直径增大至 17.73 μm。	[17]

注:营养成分变化都以不施用磷肥为对照。下同。
Note: Changes of nutrients are referenced to phosphate-free control unless otherwise specified. The same below.

站以基肥形式施用 180 kg/hm² 磷肥时, 淀粉含量却仅增加 2%^[13]。

淀粉中直链淀粉和支链淀粉的含量和比例也会受到施磷量和施磷方式的影响^[14-16]。刘开昌等^[14]研究发现, ‘高油 1 号’ 的直链淀粉含量随着施磷量的增加呈先稍有下降而后上升的趋势, 支链淀粉含量则随着施磷量的增加而逐渐降低, 而 ‘掖单 13’ 中支链淀粉含量随着施磷量的增加而增加。施磷量由 60 kg/hm² 增加至 180 kg/hm², ‘中单 909’ 的直链淀粉含量由 22 g/100 g 降低至 20 g/100 g 左右^[15]。Harish^[16] 等研究发现, 以基肥施用 50 kg/hm² 磷肥并且结合叶面喷施磷肥、接种丛枝菌根真菌以及磷溶解菌, 与不施磷肥相比, 支链淀粉含量由 81.5 g/100 g 降低至 76.0 g/100 g, 直链淀粉含量由 21 g/100 g 增加至 24 g/100 g。

淀粉的颗粒大小也会受到施磷量和施磷时期的影响。适宜的施磷量和施磷时机可促进玉米吸收更多的磷元素, 使淀粉颗粒变大^[15,17]。例如施磷量由 0 增加至 120 kg/hm² 时, ‘中单 909’ 淀粉颗粒直径由 14.30 增大至 15.25 μm^[15]。在糯玉米生长至六叶期施磷较播种期施用, 其淀粉颗粒直径由 16.58 增大至 17.73 μm^[17]。

相较于支链淀粉, 直链淀粉结构更加紧密不容

易与人体消化道中的唾液淀粉酶和胰淀粉酶结合, 直链淀粉含量增加还会促进淀粉-脂质-蛋白质复合物的形成, 从而降低淀粉的消化速率, 使人体的血糖上升速度变慢^[18-20], 玉米淀粉颗粒直径越大, 比面积越小, 淀粉与消化酶的接触面积就越小, 血糖上升速度也会变得缓慢^[21]。综上, 磷肥会通过影响直链和支链淀粉含量以及淀粉颗粒大小影响人体对淀粉的消化和吸收。

2.2 蛋白质及氨基酸

玉米籽粒中蛋白质含量为 8~11 g/100 g, 主要由醇溶蛋白和谷蛋白组成, 且含有人体所需的 9 种必需氨基酸, 但氨基酸组成不均衡, 赖氨酸和色氨酸是主要限制性氨基酸^[22]。施磷量和磷肥种类会影响蛋白质含量及氨基酸组成, 受影响程度与土壤中氮含量以及玉米品种有关, 但也有部分研究表明蛋白质含量不受磷肥的影响^[12,23-30] (表 2)。

施磷量对玉米籽粒中蛋白质的含量和组成的影响与土壤中的氮元素含量和品种存在相关性, 在土壤含氮充足的条件下, 适量增施磷肥可以增加玉米蛋白质和赖氨酸的含量, 但当磷肥施用量超过玉米对磷的最大吸收量后, 继续增施磷肥, 蛋白质含量不会持续增加, 反而会出现下降的现象^[12,23-28]。例如, ‘郑单 958’ 的粗蛋白含量随着施磷量增加而

表 2 不同磷肥管理对玉米籽粒中蛋白质及氨基酸含量和组成的影响

Table 2 Effect of phosphate fertilizer on the content and composition of protein and amino acids in maize grains

玉米品种 Corn cultivar	磷肥管理 P management	蛋白质及氨基酸组成及含量 Content and composition of protein and amino acids	文献 Reference
郑单 958	增施 25 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	赖氨酸含量增加约 72.8%。	[12]
10 个优质蛋白玉米杂交种	土壤氮不充足条件下, 增施 40 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	蛋白质含量无显著变化。	[23]
农大 115(高油)、白玉 109(高淀粉)	增施 60 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	2 个品种的醇溶蛋白分别由 2.74 g/100 g 增至 3.17 g/100 g, 3.17 g/100 g 增至 3.93 g/100 g。	[24]
广糯号	增施 180 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	游离氨基酸和可溶性蛋白质含量分别增加 10.0% 和 11.5%, 赖氨酸无显著变化。	[25]
P1197CYXR	滴灌 K ₂ HPO ₄ 溶液, 20 mg/L。	氮含量减少约 36%。	[26-28]
MC670	29.4 kg/hm ² (NH ₄)H ₂ PO ₄ , 膜下滴灌。	脯氨酸含量增加 18.6% ($P<0.05$)。	[29]
Class 106	100 kg/hm ² (NH ₄)H ₂ PO ₄ 与 4 t 有机肥配施, 基肥; 并接种解磷菌。	蛋白质含量由 9.44 g/100 g 增至 23.00 g/100 g。	[30]

显著增加,赖氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、亮氨酸含量也均显著增加,但当磷肥用量超过 100 kg/hm²时,籽粒中蛋白质含量则不再增加^[12]。高蛋白玉米在低氮条件下施用磷肥,其籽粒中蛋白质含量无显著变化^[23],高油和高淀粉玉米在施用氮肥的基础上施用磷肥,其醇溶蛋白含量分别增加 16% 和 24%,但仅施用磷肥并不会影响蛋白质含量及组成^[24]。鲜食玉米‘广糯号’在施氮、钾的基础上,增施 75 kg/hm² Ca(H₂PO₄)₂可以增加可溶性蛋白和游离氨基酸的含量,而赖氨酸却无显著变化^[25]。而当磷肥施用量超过玉米最大籽粒产量所需的磷吸收量时,籽粒中氮的含量及其他干物质积累和产量均呈现下降趋势,例如当磷肥施用量超过 580 mg/株时,籽粒中氮的含量减少了约 36%^[26-28]。

此外,磷肥种类对蛋白质和氨基酸组成也存在影响,适宜的磷肥种类会增加蛋白质含量^[29-30]。已有研究发现对玉米杂交种‘MC670’施用液体磷肥可使玉米籽粒中的脯氨酸和蛋白质含量增加^[29],对玉米‘Class 106’配施有机磷肥并接种解磷菌也可以提高玉米籽粒中蛋白质的含量^[30]。

2.3 脂肪及脂肪酸

玉米籽粒中脂肪及脂肪酸含量约为 3~4 g/100 g,依据化学结构可分为饱和脂肪酸(棕榈酸、硬

脂酸和花生酸等)和不饱和脂肪酸(油酸、亚油酸和亚麻酸等),在不饱和脂肪酸中,亚油酸是主要成分,约占总脂肪酸的 60%,由于人体无法合成亚油酸,因此必须通过饮食摄取,以维持人体正常生理功能^[31-32](表 3)。

施磷量会影响玉米脂肪含量及组成,一定范围内增施磷肥可以提高籽粒中脂肪和不饱和脂肪酸的含量,降低饱和脂肪酸的含量^[12-13],但磷肥对脂肪的增加作用有限,持续增施磷肥并不会使脂肪含量持续增加,磷肥过量可能会降低脂肪含量,且高油玉米相较于普通玉米受影响程度更为显著^[33-35]。例如,增施 90 kg/hm²磷肥可使‘高油 1 号’脂肪含量显著增加 16.87%^[33]。施磷量为 25 kg/hm²时,‘郑单 958’油酸含量增加 2.3%,棕榈酸和硬脂酸含量分别降低了 0.9% 和 0.5%,而当施磷量超过 25 kg/hm²,脂肪酸含量则无显著变化^[12]。增施 135 kg/hm²磷肥时,‘四密 25’的脂肪酸总量、亚油酸、软脂酸含量则随着施磷量的增加而略有增加,磷肥施用量过量会使油酸、亚麻酸和硬脂酸的含量下降^[34]。但也有研究显示,8 个德国杂交玉米的脂肪酸含量受播种时期和品种的影响,而不受磷肥施用量的影响,这可能是由于一些玉米品种可以通过自身的调节机制来应对土壤中磷含量的变化,从而保持脂肪酸合成的稳定性^[35]。

表 3 不同磷肥管理对玉米籽粒中脂肪及脂肪酸含量和组成的影响

Table 3 Effect of phosphate fertilizer on the content and composition of fat and fatty acids in maize grains

玉米品种 Corn cultivar	磷肥管理 P management	脂肪及脂肪酸组成及含量 Content and composition of fat and fatty acids	文献 Reference
郑单 958	增施 25 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	亚油酸显著增加, 棕榈酸和硬脂酸显著减少。	[12]
高油 1 号	增施 90 kg/hm ² KH ₂ PO ₄ , 基肥。	脂肪由 7.17 g/100 g 增至 8.43 g/100 g, 增加约 17.57%。	[13]
掖单 13 号		脂肪由 4.13 g/100 g 增至 4.62 g/100 g, 增加约 11.86%。	
P3396	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 由 30 增施至 90 kg/hm ² , 基肥。	脂肪含量由 5.17 g/100 g 减少至 4.0 g/100 g。	[33]
通油 1 号	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 由 75 kg/hm ² 增至 135 kg/hm ² , 基肥。	亚油酸由 5.84 mg/g 减少至 4.89 mg/g, 减少约 16.30%, 亚麻酸由 0.11mg/g 减少至 0.06 mg/g, 减少约 45.5%。	[34]
四密 25	135 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	不饱和脂肪酸含量无显著变化。	[34]
8 个德国 杂交种	增施 52.9 kg/hm ² (NH ₄) ₂ HPO ₄ , 基肥。	脂肪含量无显著变化。	[35]

3 磷肥对玉米功能营养成分的影响

3.1 抗氧化活性成分

玉米籽粒中的抗氧化活性成分可根据其化学结构和功能特点分为脂溶性、酚类及黄酮类以及其他抗氧化活性成分,这些成分具有清除自由基、抗氧化和衰老等多种生理功能^[36]。生育酚也称为维生素 E,玉米中的生育酚可分为 α-、β-、γ-和 δ-生育酚,其中 γ-生育酚是玉米中主要的存在形式,可以维持细胞膜的完整性和作为脂溶性抗氧化剂^[37]。玉米中的类胡萝卜素主要分为 β-胡萝卜素、叶黄素、玉米黄质和隐黄质,其中叶黄素和玉米黄质含量是最高的,分别占类胡萝卜素的 18.5%~51.9% 和 28.6%~53.3%。叶黄素可以作为维生素 A 原和抗氧化剂淬灭单线态氧自由基,不同品种的玉米叶黄素含量具有显著差异^[38]。目前已有的研究主要围绕磷肥对生育酚、类胡萝卜素这两类脂溶性抗氧化成分在籽粒中含量和组成的影响^[12,39-42](表 4)。

已有研究发现,施磷量为 25 kg/hm² 时,籽粒中叶黄素、玉米黄质和 β-胡萝卜素的含量显著增加,而生育酚含量无显著变化,而当施磷量为 100 kg/hm² 时,γ-生育酚以及总生育酚含量显著下降^[12],也

有研究发现籽粒中的磷含量与生育酚呈正相关,与类胡萝卜素成呈相关,例如籽粒中总磷与 γ-生育酚呈正相关($r=0.683, P<0.05$)而与玉米黄质呈负相关($r=-0.629$)^[39]。但也有田间试验结果显示,施用磷肥对类胡萝卜素无显著影响,这可能是由于土壤中有效磷含量以及玉米品种不同所导致的^[40]。综上,磷肥施用量对玉米籽粒中类胡萝卜素和生育酚的含量有显著影响^[14]。适量的磷肥可以显著提高类胡萝卜素的含量,但对生育酚的含量影响不大,而过量的磷肥则会导致生育酚浓度下降。此外,磷肥的施用会增加玉米籽粒中植酸的含量,而植酸也具有一定的抗炎、抗氧化性,减少脂质过氧化的作用,保护玉米籽粒在储存过程中免受氧化损伤,延长玉米的贮藏期;也可以作为天然抗氧化剂添加到食品中以延长食品的保质期,还可用于制备功能性食品以提高人体的抗氧化能力^[41-42]。

3.2 矿物质

施磷会影响玉米籽粒中 Zn、Cu、Fe、Ca、Mg 含量及生物利用度^[43-52](表 4)。苏达等^[43]研究发现,磷肥施用量会导致玉米籽粒中 Zn 含量显著下降;磷施用量 300 kg/hm² 时,‘闵双色 4 号’和‘粤甜 28 号’这 2 个甜玉米品种籽粒中 Zn 含量减少 30.08%。且已有研究表明,高磷对玉米中 Zn 的合成和积累的

表4 不同磷肥管理对玉米籽粒中功能营养成分含量及组成的影响

Table 4 Effect of phosphate fertilizer on the content and composition of functional nutrients in maize grains

功能营养成分 Functional nutrient	玉米品种 Corn cultivar	磷肥管理 P management	营养成分含量及组成 Content and composition of functional nutrients	文献 Reference
抗氧化物质 Antioxidant	郑单 958	增施 25 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	β胡萝卜素和叶黄素含量显著增加, γ-生育酚含量显著增加且与籽粒中的磷含量成正相关。	[12, 39]
		增施 100 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	生育酚含量显著减少。	[12]
	Amagrnao	增施 52.9 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O, 基肥。	类胡萝卜素和生育酚均无显著变化。	[40]
矿物质 Mineral	粤甜 28 号	增施 300 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	Zn 含量显著降低, 降低 30.08%。	[43-47]
	郑单 958	增施 200 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	Cu 含量由 2.10 mg/kg 减少至 1.56 mg/kg, 减少了 25.60%, Fe 含量无显著变化。	[48]
		增施 100 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	Fe 含量由 25.00 mg/kg 减少至 18.82 mg/kg, 减少了约 32.80%。	[12]
	先甜 5 号 广良甜 31 号 闽双色 4 号 永珍 7 号	增施 300 kg/hm ² Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 基肥。	Ca 含量由 0.19 g/kg 减少至 0.15 g/kg, 减少了约 21.05%。	[49-50]
	Simon (杂交种)	60 kg/hm ² 单铵磷酸盐和 180 g/hm ² 丛枝菌根真菌组合施用。	Mg 含量由 4.56 g/kg 增加至 4.90 g/kg, 增加了约 7.46%。	[51]

抑制显著高于小麦和水稻等其他粮食作物^[44-47],这可能是由于植物体内 Zn 转运蛋白的表达受到磷的调控^[45]。此外,Zhang 等^[48]研究发现,施磷会显著降低籽粒中 Cu 的含量;当施磷量从 0 增加至 200 kg/hm² 时,籽粒中 Cu 含量由 2.10 mg/kg 减至 1.56 mg/kg,减少 25.60% 左右;Cu 含量的显著降低可能是由于高磷会抑制土壤中丛枝菌根真菌,从而抑制玉米对 Cu²⁺ 的吸收,而籽粒中的 Fe 含量无显著变化。但是也有研究显示,施磷量为 100 kg/hm² 时,籽粒中 Fe 含量降低约 32.8%^[12]。过量施用磷肥会降低籽粒中的 Ca 含量,施用 300 kg/hm² 磷肥时,4 种甜玉米的 Ca 含量均较不施磷肥减少,平均减少 21.05% 左右,且玉米生长早期(授粉后 8 和 16 d)对磷肥引起的 Ca 含量及其生物利用度的变化更为敏感^[49],这可能是由于高磷抑制 Ca²⁺ 的转运,导致 Ca²⁺ 向地上部分的运输减少,进而导致 Ca 在籽粒中的积累减少^[50]。施磷会使籽粒中 Mg 的含量增加^[51]。但是,由于磷肥的施用会增加玉米籽粒中植酸的含量,而植酸会与 Zn、Fe、Ca 等微量元素形成难溶性的植酸盐,阻碍人体的对这些微量元素的吸收和利用^[41]。综上,过量施用磷肥会降低玉米籽粒

中 Zn、Cu 及 Ca 的含量及生物利用度。

4 磷肥管理影响玉米营养的机制研究

4.1 磷的吸收、转运及分配

玉米籽粒中营养成分组成和含量会受到玉米有效吸收、转运及分配的磷的影响,充足的磷供应可以保障光合器官高效合成碳水化合物、氨基酸等,同时促进磷向籽粒转运,籽粒中磷的积累水平直接关联 ATP、NADPH 等能量载体的合成和磷酸化反应,为营养物质的合成和代谢提供必需的能量与含磷化合物^[52-53]。

玉米对磷的吸收、转运及分配过程主要是通过根系吸收土壤中以 H₃PO₄⁻ 和 H₂PO₄²⁻ 形式存在的有效磷,吸收的磷在根细胞中积累,一部分用于满足根系自身代谢需求,大部分则通过木质部向地上部转运,在进入生殖生长期后,磷从叶片和茎秆等营养器官向籽粒中转运并积累^[54]。

已有研究发现,层施和穴施磷肥相较于撒施可以改善夏玉米根系构型,提高深层土壤的根长、根表面积、根体积和根系干重,增大根系与磷肥的接触面积,从而促进玉米对磷的吸收^[54];在低磷条件

下玉米根系构型会发生改变,并分泌酸性磷酸酶和有机酸溶解土壤中难溶性磷酸钙($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)并释放出 PO_4^{3-} ^[55];长期施用磷肥可以影响微生物群落组成,并降低了土壤细菌中编码碱性磷酸单酯酶的基因 $phoD$ 的表达丰度,进而显著抑制碱性磷酸单酯酶活性,该酶能够分解土壤中的磷酸单酯和磷酸二酯,从而释放出 PO_4^{3-} 离子供玉米吸收^[56];高磷还可抑制丛枝菌根真菌和磷溶解菌的生长,这些微生物可以分解土壤中的难溶性磷,增加磷的有效性,从而扩大根系的吸收范围,促进玉米对磷的吸收^[57]。综上,磷肥种类、磷肥用量、施磷方式和施磷时期通过影响土壤pH、根系形态和根系分泌物、植物基因表达和信号转导、植物-微生物互作来调节玉米对磷的吸收、转运及分配。

除了磷肥管理的影响外,土壤性质、天气条件等外部环境也会影响玉米对磷的吸收和利用效率^[57-60]。在酸性土壤中游离的磷更容易与矿物质元素结合形成难溶性磷酸盐,导致玉米无法吸收和利用^[57],不同磷肥施入不同pH的土壤中,对磷有效性的提升效果也不同, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 可显著提高酸性土壤的pH,增加磷的有效性, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 则可降低土壤pH,有利于土壤有效磷的增加^[58];在干旱条件下,因土壤水分不足会影响磷的移动性和植物的吸收^[59-60]。

4.2 磷参与玉米营养成分的合成及代谢

磷信号通路可以调控碳水化合物、脂肪酸、类胡萝卜素等营养成分代谢相关酶活性和基因的表达^[61-64]。在淀粉合成中,腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGPase)的活性会因无机磷的浓度升高而受抑制^[61],在施磷量为 46 kg/hm^2 时,开花后第7天的AGPase、GBSSII、SS和SBEII等淀粉相关合成酶的基因表达显著高于施磷量为0和 92 kg/hm^2 的处理^[62]。在脂肪酸代谢中,磷肥会影响甘油三酯合成所需的磷酸甘油酸激酶的活性,磷缺乏抑制磷酸酶相关基因的表达并降低其活性,从而影响脂肪的分解和再合成^[53];在类胡萝卜素合成中,磷分别是前体乙酰辅酶A(acetyl-CoA)和中间体香叶基二磷酸(geranylgeranyl diphosphate)形成所必需的^[63];施用磷肥可以促进玉米对氮的吸收,而氮是蛋白质组成的重要元素,磷肥还可以促进Cu、Fe、Zn等微量元素从根部向籽粒的转运,这些微量元素是蛋白质合成中所必须的辅助因子^[26,64]。

综上,磷肥管理影响玉米营养的机制可分为2个方面:施磷量、磷肥种类、施磷方式和时期等调控根系对磷的吸收、转运和分配;吸收后的磷可以调控蛋白质、脂质等代谢途径中关键基因的表达,也可以作为代谢物的组分和关键调节因子直接参与营养物质的合成和代谢。二者相互协调,共同影响玉米营养成分的合成和代谢。

5 总结与展望

综上,适宜的田间磷肥管理如优化施磷量、时期、配施有机肥等均可提高淀粉、人体必需氨基酸、不饱和脂肪酸及类胡萝卜素、生育酚等功能营养成分的含量,但是磷肥利用效率受品种、土壤及环境的影响,磷过量或不足均可导致品质下降,机制主要包括影响玉米根系对磷的吸收和转运,以及磷在碳水化合物、氨基酸等合成和代谢途径中发挥的促进关键酶表达或作为关键调控因子等作用。

针对已有研究存在的不足,未来可以深入开展3个方面的研究:1)可进一步探究磷肥对玉米其他营养品质、加工以及食用安全问题。磷肥通过对营养成分含量和组成的影响可能会间接影响玉米粉的糊化、水合能力等^[65-66]。过量和长期施用含金属杂质的磷肥会导致玉米重金属如Pb、Cd、Cr、As等积累^[67-69],食用前需进行安全评估。2)建立普适性的“磷-环境-玉米营养”预测模型,磷肥利用效率受到土壤性质、气候条件等环境因素的影响,而当前研究多基于短期试验,环境互作与区域适应性研究仍不足。3)利用转录组、代谢组学等方法深入分析磷肥影响玉米营养成分积累和代谢的分子机制,从而可以设计以提升玉米营养价值为导向的精准磷肥管理,如“应激营养淀粉”^[70]即通过精准施肥而获得特定功能的改性淀粉。

参考文献 References

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2023-03-01]. <https://data.stats.gov.cn/publish.htm?sort=1>
National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of National Economic and Social Development of the People's Republic of China[EB/OL]. [2023-03-01]. [https://data.stats.gov.cn/publish.htm?sort=1\(in Chinese\)](https://data.stats.gov.cn/publish.htm?sort=1(in%20Chinese))
- [2] Sheng S Y, Tong L, Liu R H. Corn phytochemicals and their health benefits [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2018, 7(3): 185-195
- [3] Li D C, Hao A Q, Shao W, Zhang W W, Jiao F C, Zhang H Y, Dong X Y, Zhan Y, Liu X, Mu C H, Ding Z H, Xue D, Chen J T, Wang M. Maize kernel nutritional quality-an old challenge for modern breeders [J/OL].

- Planta*, (2025-02-25). DOI: doi.org/10.1007/s00425-025-04627-y
- [4] Blanch G P, de Pascual-Teresa S, Ruiz Del Castillo M L. Study on the phenolic composition and antioxidant properties of white-, yellow-, and black-corn (*Zea mays* L.) foodstuffs[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(13):6263-6271
 - [5] Bouyahya A, El Omari N, Hakkur M, El Hachlafi N, Charfi S, Balahbib A, Guaouguaou F E, Rebezov M, Maksimiuk N, Ali Shariati M, Zengin G, El Menyiy N, Chamkhi I, Bakrim S. Sources, health benefits, and biological properties of zeaxanthin[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118:519-538
 - [6] Naomi M R, Supriyono, Nurmalasari I A, Pardono. Role of phosphate fertilizer on growth and yield of hybrid maize (*Zea mays* L.)[J/OL]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (2021-03-26). DOI: doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012070
 - [7] Wang Y, Chen Y F, Wu W H. Potassium and phosphorus transport and signaling in plants[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2020, 63(1): 34-52
 - [8] Lemos E F, de Mello Prado R. Relationships between doses and application methods of phosphorus and corn nutrition status and grain yield [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(20):2402-2411
 - [9] Case S E, Capitani T, Whaley J K, Shi Y C, Trzasko P, Jeffcoat R, Goldfarb H B. Physical properties and gelation behavior of a low-amylopectin maize starch and other high-amylose maize starches[J]. *Journal of Cereal Science*, 1998, 27(3):301-314
 - [10] Lv X X, Hong Y, Zhou Q W, Jiang C C. Structural features and digestibility of corn starch with different amylose content[J/OL]. *Frontiers in Nutrition*, (2021-12-01). DOI: doi.org/10.3389/fnut.2021.756096
 - [11] Ma X H, Liu Y, Liu J S, Zhang J J, Liu R N. Changes in starch structure, flour processing characteristics, and in vitro digestibility of maize induced by germination[J/OL]. *Food Science and nutrition*, (2024-02-13). DOI: doi.org/10.1002/fsn3.1457
 - [12] Yu B G, Chen X X, Zhou C X, Ding T B, Wang Z H, Zou C Q. Nutritional composition of maize grain associated with phosphorus and zinc fertilization [J/OL]. *Journal of Food Composition and Analysis*, (2022-10-01). DOI: doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104775
 - [13] Li W Y, Wu P J, Yan S H. Effects of phosphorus fertilizer on starch granule size distribution in corn kernels[J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2019, 42 (2):201-207
 - [14] 刘开昌, 胡昌浩, 董树亭, 王空军, 李爱芹. 高油玉米需磷特性及磷素对籽粒营养品质的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(2):267-272
Liu K C, Hu C H, Dong S T, Wang K J, Li A Q. Characteristic of phosphorus absorption of high oil maize and effects of phosphorus on its kernel quality[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(2):267-272 (in Chinese)
 - [15] 贺江, 付立冬, 李文阳. 磷肥对玉米籽粒淀粉粒度分布特性与黏度参数的影响[J]. *玉米科学*, 2019, 27(6):153-159
He J, Fu L D, Li W Y. Effects of phosphate fertilizer on starch size distribution and viscosity parameters of maize kernel[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(6):153-159 (in Chinese)
 - [16] Harish M N, Choudhary A K, Kumar S, Dass A, Singh V K, Sharma V K, Varatharajan T, Dhillon M K, Sangwan S, Dua V K, Nitesh S D, Bhavya M, Sangwan S, Prasad S, Kumar A, Rajpoot S K, Gupta G, Verma P, Kumar A, George S. Double zero tillage and foliar phosphorus fertilization coupled with microbial inoculants enhance maize productivity and quality in a maize-wheat rotation[J/OL]. *Scientific Reports*, (2022-02-18). DOI: doi.org/10.1038/s41598-022-07189-0
 - [17] Yuan C, Wang S Y, Lu D L. Fertilization time of slow-release fertilizer affects the physicochemical properties of starch from spring-sown waxy maize [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(3):1012-1020
 - [18] Ahmadi-Abhari S, Woortman A J J, Oudhuis A A C M, Hamer R J, Loos K. The influence of amylose-LPC complex formation on the susceptibility of wheat starch to amylase[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 97(2):436-440
 - [19] Lim J H, Kim H R, Choi S J, Park C S, Moon T W. Complexation of amylomucase-modified waxy corn starch with fatty acids: Determination of their physicochemical properties and digestibilities [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(6):1362-1370
 - [20] Zhou X, He S, Jin Z Y. Impact of amylose content on the formation of V-type granular starch[J/OL]. *Food Hydrocolloids*, 2024, (2023-11-01). DOI: doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109257
 - [21] Dhital S, Shrestha A K, Gidley M J. Relationship between granule size and in vitro digestibility of maize and potato starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 82(2):480-488
 - [22] Mitchell H H, Hamilton T S, Beadles J R. The relationship between the protein content of corn and the nutritional value of the protein [J]. *The Journal of Nutrition*, 1952, 48(4):461-476
 - [23] Shawa H, van Biljon A, Labuschagne M T. Protein quality and quantity of quality protein maize (QPM) and non-QPM hybrids under optimal and low nitrogen conditions[J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 98(3):507-516
 - [24] 黄绍文, 孙桂芳, 金继运, 左余宝, 何萍. 氮、磷和钾营养对优质玉米籽粒产量和营养品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3):225-230
Huang S W, Sun G F, Jin J Y, Zuo Y B, He P. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium application on grain yield and qualities of high-oil and high-starch corn [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2004, 10 (3):225-230 (in Chinese)
 - [25] 陈惠阳, 冯颖竹. 磷肥对鲜食糯玉米籽粒建成及品质形成的影响[J]. *耕作与栽培*, 2005, 25(3):28-30, 22
Chen H Y, Feng Y Z. Effect of phosphorus fertilizer on grain formation and quality formation of fresh waxy corn[J]. *Tillage and Cultivation*, 2005, 25 (3):28-30, 22 (in Chinese)
 - [26] Penn C J, Camberato J J, Wiethorn M A. How much phosphorus uptake is required for achieving maximum maize grain yield? part 2: Impact of phosphorus uptake on grain quality and partitioning of nutrients[J/OL]. *Agronomy*, (2023-01-23). DOI: doi.org/10.3390/agronomy13020316
 - [27] Cadot S, Bélanger G, Ziadi N, Morel C, Sinaj S. Critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of P fertilization [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 112(3):417-433
 - [28] 李海叶, 黄少欣, 朱东宇, 王瑞雪, 汤利, 郑毅, 肖靖秀. 云南中、低供磷能力土壤玉米最佳施磷量研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(6):1039-1046
Li H Y, Huang S X, Zhu D Y, Wang R X, Tang L, Zheng Y, Xiao J X. Optimizing phosphate fertilization in relation to phosphorus supply capacity of soils in Yunnan maize producing areas[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6):1039-1046 (in Chinese)
 - [29] 陈煜林, 胡义熬, 杨永胜, 杨依凡, 涂攀峰, 薛鑫海, 郑宇程, 邓兰生. 液体磷肥用量对玉米生长产量及品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(10): 129-133
Chen Y L, Hu Y A, Yang Y Y, Yang I F, Tu P F, Xue X H, Zheng Y C, Deng L S. Effect of liquid phosphate fertilizer application rate on maize growth, yield and quality of maize [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(10):129-133 (in Chinese)
 - [30] Al-Budeiri M H, Oudah Al-Shami Y A. Effect of addition mineral, organic and bio-fertilizers on nitrogen, phosphorous, potassium concentration and

- protein of corn crop (*Zea mays* L.) [J/OL]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, (2021-05-12). DOI: doi.org/10.1088/1755-1315/735/1/012062
- [31] Ignjatovic-Micic D, Vancetovic J, Trbovic D, Dumanovic Z, Kostadinovic M, Bozinovic S. Grain nutrient composition of maize (*Zea mays* L.) drought-tolerant populations[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(4):1251-1260
- [32] Moreau R A, Lampi A M, Hicks K B. Fatty acid, phytosterol, and polyamine conjugate profiles of edible oils extracted from corn germ, corn fiber, and corn kernels[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2009, 86(12):1209-1214
- [33] Ray K, Banerjee H, Dutta S, Hazra A k, Majumdar K. Macronutrients influence yield and oil quality of hybrid maize (*Zea mays* L.) [J/OL]. *PLoS One*, (2019-05-09). DOI: doi.org/10.1371/journal.pone.0216939
- [34] 何萍, 金继运, 李文娟, 刘海龙, 黄绍文, 王秀芳, 王立春, 谢佳贵. 施磷对高油玉米和普通玉米吸磷特性及品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 538-543
- He P, Jin J Y, Li W J, Liu H L, Huang S W, Wang X F, Wang L C, Xie J G. Comparison of phosphorous absorption, quality and yield between high oil maize and common maize as influenced by phosphorous application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3):538-543 (in Chinese)
- [35] Lux P E, Schneider J, Müller F, Wiedmaier-Czerny N, Vetter W, Weiß T M, Würschum T, Frank J. Location and variety but not phosphate starter fertilization influence the profiles of fatty acids, carotenoids, and tocopherols in kernels of modern corn (*Zea mays* L.) hybrids cultivated in Germany[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(9): 2845-2854
- [36] Moros E E, Darnoko D, Cheryan M, Perkins E G, Jerrell J. Analysis of xanthophylls in corn by HPLC [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(21):5787-5790
- [37] Panfili G, Fratianni A, Irano M. Normal phase high-performance liquid chromatography method for the determination of tocopherols and tocotrienols in cereals[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(14): 3940-3944
- [38] Sun X H, Ma L, Lux P E, Wang X, Stuetz W, Frank J, Liang J F. The distribution of phosphorus, carotenoids and tocopherols in grains of four Chinese maize (*Zea mays* L.) varieties[J/OL]. *Food Chemistry*, (2021-10-01). DOI:doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130725
- [39] 孙小红. 营养成分在玉米籽粒的分布及应用枯草芽孢杆菌发酵改善玉米胚芽产品营养的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2022
- Sun X H. Distribution of nutritional components in maize grain and improvement of nutritional value of maize germ products by *Bacillus subtilis* Fermentation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [40] Lux P E, Freiling M, Stuetz W, von Tucher S, Carle R, Steingass C B, Frank. (poly)phenols, carotenoids, and tocopherols in corn (*Zea mays* L.) kernels as affected by phosphate fertilization and sowing time[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(2):612-622
- [41] Lux P E, Fuchs L, Wiedmaier-Czerny N, Frank J. Oxidative stability of tocopherols, carotenoids, and fatty acids in maize (*Zea mays* L.) porridges with varying phytate concentrations during cooking and in vitro digestion[J/OL]. *Food Chemistry*, (2022-02-15). DOI: doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132053
- [42] Kumar A, Singh B, Raigond P, Sahu C, Mishra U N, Sharma S, Lal M K. Phytic acid: Blessing in disguise, a prime compound required for both plant and human nutrition[J/OL]. *Food Research International*, (2021-02-01). DOI: doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110193
- [43] 苏达, 颜晓军, 蔡远扬, 梁恬, 吴良泉, MUHAMMAD Atif Muneer, 叶德练. 磷肥对甜玉米籽粒植酸和锌有效性的影响[J]. *作物学报*, 2022, 48(1):203-214
- Su D, Yan X J, Cai Y Y, Liang T, Wu L Q, Muneer M, Ye D L. Effects of phosphorus fertilizer on kernel phytic acid and zinc bioavailability in sweet corn kernels[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(1):203-214 (in Chinese)
- [44] Liu D, Y, Liu Y M, Zhang W, Chen X P, Zou C Q. Agronomic approach of zinc biofortification can increase zinc bioavailability in wheat flour and thereby reduce zinc deficiency in humans[J/OL]. *Nutrients*, (2017-08-24). DOI: doi.org/10.3390/nu9090465
- [45] Zhang W, Zhang W S, Wang X Z, Liu D Y, Zou C Q, Chen X P. Quantitative evaluation of the grain zinc in cereal crops caused by phosphorus fertilization. A meta-analysis [J/OL]. *Agronomy for Sustainable Development*, (2021-01-01). DOI: doi.org/10.1007/s13593-020-00662-z
- [46] Buerkert A, Haake C, Ruckwied M, Marschner H. Phosphorus application affects the nutritional quality of millet grain in the Sahel[J]. *Field Crops Research*, 1998, 57(2):223-235
- [47] Yu B G, Zhou C X, Wang Z H, Bucher M, Schaaf G, Sawers R J H, Chen X P, Hochholdinger F, Zou C Q, Yu P. Maize zinc uptake is influenced by arbuscular mycorrhizal symbiosis under various soil phosphorus availabilities [J]. *The New Phytologist*, 2024, 243(5):1936-1950
- [48] Zhang W, Zou C Q, Chen X X, Liu Y M, Liu D Y, Yang H Y, Deng Y, Chen X P. Phosphorus application decreased copper concentration but not iron in maize grain[J/OL]. *Agronomy*, (2020-10-25). DOI: doi.org/10.3390/agronomy10111645
- [49] Su D, Jin Z Y, Ou J, Muneer M A, Jiang Y F, Ye D L, Wu L Q, Yan X J. Spatial-temporal variation of grain magnesium, calcium and their response to phosphorus nutrition in sweet corn[J/OL]. *Food Science and Nutrition*, (2025-01-10). DOI:doi.org/10.1002/fsn3.4725
- [50] Baloch S, Noreen S, Mahmood S, Zahra N, Azeem A, Altaf M M, Salim Akhter M, Abbas A. Unlocking *Triticum aestivum* L resilience: Exogenous proline's remarkable role in mitigating lead stress, and delving into the secrets of TaGSK1 expression gene[J]. *South African Journal of Botany*, 2024, 166: 79-87
- [51] de Souza Buzo F, Garcia N F S, Garé L M, Gato I M B, Martins J T, Martins J O M, de Souza Morita P R, Santos Reis de Andrade Silva M, de Souza Sales L Z, Nogales A, Rigobelo E. C, Arf O. Phosphate fertilization and mycorrhizal inoculation increase corn leaf and grain nutrient contents[J/OL]. *Agronomy*, (2022-07-01). DOI: doi.org/10.3390/agronomy12071897
- [52] Wang F, Cui P J, Tian Y, Huang Y, Wang H F, Liu F, Chen Y F. Maize ZmPT7 regulates Pi uptake and redistribution which is modulated by phosphorylation[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2020, 18(12): 2406-2419
- [53] Sharifi S, Shi S M, Obaid H, Dong X S, He X H. Differential effects of nitrogen and phosphorus fertilization rates and fertilizer placement methods on P accumulations in maize[J/OL]. *Plants*, (2024-06-17). DOI:doi.org/10.3390/plants13131778
- [54] Guo Y H, Wang Z, Li J S. Effects of phosphorus fertilizer type and dripline depth on root and soil nutrient distribution, nutrient uptake, and maize yield under subsurface drip fertigation[J/OL]. *Field Crops Research*, (2024-11-01). DOI:doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109585
- [55] Wen Z H, Li H G, Shen J B, Rengel Z. Maize responds to low shoot P concentration by altering root morphology rather than increasing root exudation[J]. *Plant and Soil*, 2017, 416(1):377-389
- [56] Chen X D, Jiang N, Condron L M, Dunfield K E, Chen Z H, Wang J K, Chen L J. Impact of long-term phosphorus fertilizer inputs on bacterial phoD gene community in a maize field, northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 1011-1018

- [57] Zhao Y N, Li R K, Huang Y F, Sun X M, Qin W, Wei F F, Ye Y L. Effects of various phosphorus fertilizers on maize yield and phosphorus uptake in soils with different pH values[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2022, 68(12):1746-1754
- [58] Wang L Y, Rengel Z, Cheng L Y, Shen J B. Coupling phosphate type and placement promotes maize growth and phosphorus uptake by altering root properties and rhizosphere processes[J/OL]. *Field Crops Research*, (2025-01-25). DOI: doi.org/10.1016/j.fcr.2021.109225
- [59] Mahmood M, Wang J J, Mehmood S, Ahmed W, Ayyoub A, Seleiman M F, Elrys A S, Elnahal A S M, Mustafa A, Wei X W, Li W D. Influence of drought stress on phosphorus dynamics and maize growth in tropical ecosystems[J/OL]. *BMC Plant Biology*, (2025-03-01). DOI: doi.org/10.1186/s12870-025-05672-3
- [60] Khan F, Siddique A B, Shabala S, Zhou M X, Zhao C C. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses[J/OL]. *Plants*, (2023-05-15). DOI: doi.org/10.3390/plants12101800
- [61] Makhmondova A, Williams D, Brewer D, Massey S, Patterson J, Silva A, Vassall K A, Liu F S, Subedi S, Harauz G, Michael Siu K W, Tetlow I J, Emes M J. Identification of multiple phosphorylation sites on maize endosperm starch branching enzyme IIb, a key enzyme in amylopectin biosynthesis[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2014, 289(13):9233-9246
- [62] Zhang R Q, Li C, Fu K Y, Li C, Li C Y. Phosphorus alters starch morphology and gene expression related to starch biosynthesis and degradation in wheat grain[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2018-01-30). DOI: doi.org/10.3389/fpls.2017.02252
- [63] Baseggio M, Murray M, Magallanes-Lundback M, Kaczmar N, Chamness J, Buckler E S, Smith M E, DellaPenna D, Tracy W F, Gore M A. Genome-wide association and genomic prediction models of tocochromanols in fresh sweet corn kernels[J/OL]. *The Plant Genome*, (2019-05-01). DOI: doi.org/10.3835/plantgenome2018.06.0038
- [64] Ge S H, Xiao X L, Zhang K, Yang C H, Dong J S, Chen K Y, Lv Q Y, Satheesh V, Lei M G. A plastidial lipoyl synthase LIP1p plays a crucial role in phosphate homeostasis in Arabidopsis[J]. *The Plant Journal*, 2024, 120(6):2385-2397
- [65] Tan L B, Kong L Y. Starch-guest inclusion complexes: Formation, structure, and enzymatic digestion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(5):780-790
- [66] Nafady N A, Elgharably A. Mycorrhizal symbiosis and phosphorus fertilization effects on Zea mays growth and heavy metals uptake[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(9):869-875
- [67] Jagdeep-Singh, Gobinder-Singh, Gupta N. Balancing phosphorus fertilization for sustainable maize yield and soil test phosphorus management: A long-term study using machine learning[J/OL]. *Field Crops Research*, (2023-07-01). DOI: doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109169
- [68] Chen X X, Liu Y M, Zhao Q Y, Cao W Q, Chen X P, Zou C Q. Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application[J/OL]. *Environmental Pollution*, (2020-01-01). DOI: doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114348
- [69] Sabiha-Javied, Siddque N, Waheed S, Zaman Q U, Aslam A, Tufail M, Nasir R. Uptake of heavy metal in wheat from application of different phosphorus fertilizers[J/OL]. *Journal of Food Composition and Analysis*, (2023-01-01). DOI: doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104958
- [70] Zhang X D, Guo D W, Blennow A, Zörb C. Mineral nutrients and crop starch quality[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2021, 114:148-157

责任编辑:吕晓梅



第一作者简介: 梁建芬, 博士, 中国农业大学食品科学与营养工程学院教授, 博士生导师。主要研究领域为: 谷物食品科学与加工技术, 粮油植物蛋白工程。教育部新世纪优秀人才; 宝钢优秀教师; United Nation University “Young Scientist Award”获得者。获得教育部科技进步二等奖 1 项, 湖南省自然科学二等奖 1 项, 河南省科技进步三等奖 1 项。已在 *Food Chemistry*、*LWT*、*Food Science and Technology*、*Journal of Cereals Science*、《食品科学》、《农业工程学报》、《食品科技》等学术期刊发表研究论文近百篇。近年主持和参加中德合作 IRTG 项目(2018—2027)中方负责人。