

马铃薯磷素营养研究进展

刘 鸿¹,王爱军¹,王 渊¹,杨青兰¹,
史文华¹,张 鹏¹,线志伟²,董宏祥³,刘寅笃¹

(1.甘肃省甘南藏族自治州农林牧草科学院,甘肃 合作 747000;2.甘肃省平凉市种子站,甘肃 平凉 744000;3.甘肃省甘南藏族自治州科学技术局,甘肃 合作 747000)

摘要:综述了近年来马铃薯磷素营养的研究进展,重点阐述了土壤中磷的存在形态(溶解态、吸附态、有机磷、矿物磷)及其生理功能,系统分析了马铃薯对磷的吸收利用机制、转运特性及土壤肥力、品种遗传、环境因子等关键影响因素,并提出了合理施用磷肥、选育高磷效率品种、优化栽培管理及土壤改良等提升磷素利用效率的策略,最后展望了未来研究方向,包括解析磷素高效利用的分子机制、研发新型磷肥、基因编辑育种及组学技术应用等,以为马铃薯磷素营养调控及优质高产栽培提供科学参考。

关键词:马铃薯;磷的生理功能;磷素吸收利用;磷转运机制;优质高产

中图分类号:S532

文献标识码:C

Research Progress of Phosphorus Nutrition in Potato

LIU Hong¹,WANG Aijun¹,WANG Yuan¹,YANG Qinglan¹,
SHI Wenhua¹,ZHANG Peng¹,XIAN Zhiwei²,DONG Hongxiang³,LIU Yindu¹

(1. Gannan Tibetan Autonomous Prefecture Academy of Agriculture, Forestry and Pastoral Sciences, Hezuo Gansu 747000, China; 2. Pingliang City Seed Station, Pingliang Gansu 744000, China; 3. Gannan Tibetan Autonomous Prefecture Science and Technology Bureau of Gansu Province, Hezuo Gansu 747000, China)

Abstract: This paper reviews the recent research progress in potato phosphorus nutrition, focusing on the existing forms of phosphorus in soil (dissolved phosphorus, adsorbed phosphorus, organic phosphorus and mineral phosphorus) and their physiological functions. It systematically analyzes the phosphorus absorption and utilization mechanisms, transport characteristics of potato, as well as key influencing factors including soil fertility, variety genetics and environmental factors. Furthermore, it summarizes strategies to improve phosphorus use efficiency, such as rational application of phosphorus fertilizer, breeding of varieties with high phosphorus efficiency, optimization of cultivation management and soil improvement. Finally, future research directions are prospected, including elucidating the molecular mechanisms of efficient phosphorus utilization, developing new phosphorus fertilizers, breeding through gene editing and applying omics technologies, aiming to provide scientific references for phosphorus nutrition regulation and high-quality, high-yield cultivation of potato.

Key words: potato; physiological function of phosphorus; phosphorus absorption and utilization; phosphorus transport mechanism; high quality and high yield

马铃薯作为世界第四大主要粮食作物,在全球范围内被广泛栽培和食用^[1]。近年来,随着人们对营养与健康的关注程度不断提高,马铃薯作为一种主要的淀粉源和能量供给作物,其重要性

愈发明显。

磷素作为植物生长发育的必需营养元素之一,不仅参与能量转移、核酸合成和细胞膜结构的构成,而且在植物的光合作用、呼吸作用中也

收稿日期:2025-01-08

作者简介:刘鸿(1982—),女,农艺师,主要从事农技推广工作, E-mail:2551483016@qq.com。

通信作者:刘寅笃(2000—),男,农艺师,主要从事农技推广工作, E-mail:1030238658@qq.com。

发挥着不可或缺的作用,最终反馈在产量、品质以及抗逆上^[2]。因此,深入研究马铃薯磷素营养的动态变化规律及其影响因素,对于促进马铃薯优质高产具有重要意义。本文将从磷的存在形态及生理功能、吸收利用机制及磷转运等方面综述近年来的研究进展,以期为进一步提高马铃薯产量及改善营养品质提供科学依据。

1 磷的存在形态及生理功能

1.1 磷在土壤中的存在形态

磷在土壤中的形态主要包括溶解态磷、吸附态磷、有机磷和矿物磷等。溶解态磷是植物可直接利用的磷源,尽管土壤中的溶解态磷浓度通常较低,但它对植物的生长和发育至关重要,在农田施用化肥时,溶解态磷的存在能够迅速被植物吸收,提高土壤的养分供应能力;吸附态磷是指被土壤颗粒表面吸附的磷,这部分磷并非直接可供植物利用,但其稳定性较高,能有效减少磷的流失,土壤中胶体状况、pH值、阳离子交换能力等因素都会影响磷的吸附特性,较高的土壤有机质含量通常能够提高磷的吸附能力,因此在土壤修复和改良过程中,有机肥的施用显得尤为重要;有机磷是指通过生物活动形成的磷化合物,通常存在于植物和动物残体中,这部分磷释放较慢,经过微生物的解毒和矿化作用,逐渐转化为植物可利用的形态,土壤微生物的活性在有机磷的转化过程中起到重要作用,有机磷不仅是土壤中磷的重要来源,同时也增强了土壤的生物活性;矿物磷通常指土壤中以无机矿物形式存在的磷化合物,如磷灰石、磷矿石等,这部分磷在土壤中以不溶状态存在,植物难以直接吸收,但在特定条件下(如生物风化、酸性土壤环境等),矿物磷有可能转化为植物可利用的形态^[3]。

1.2 磷的生理功能

磷素是植物生长发育不可缺少的重要无机营养元素,参与植物细胞的能量代谢、核酸和膜脂质的合成、根系发育等众多生理过程^[4]。

1.2.1 参与能量代谢

磷是植物体内ATP(腺苷三磷酸)的重要组成部分。ATP是植物进行各种生命活动的能量来源,而磷是ATP分子结构中不可或缺的部分,磷参与光合作用、呼吸作用等能量转换过程,为植物的生长提供能量支撑,如在光合作用的光反

应阶段,磷参与电子传递链的运作,在呼吸作用中,磷参与三羧酸循环和氧化磷酸化等步骤,释放能量并合成ATP^[5]。

1.2.2 参与核酸和蛋白质合成

磷是核酸(DNA和RNA)的重要组成部分。DNA携带着植物的遗传信息,而RNA则参与蛋白质的合成,磷的缺乏会直接影响DNA和RNA的合成,从而影响基因表达和蛋白质合成,最终导致植物生长发育受阻。此外,一些磷脂也是细胞膜的重要组成部分,磷的缺乏会影响细胞膜的结构和功能^[6]。

1.2.3 促进根系发育和提高抗逆性

磷参与根系生长发育的调节,影响根系的长度、数量和活力。充足的磷供应可以促进植物根系的生长和分枝,增加根系的吸收面积,提高磷的吸收效率及其他养分的吸收利用。发达的根系可以更好地吸收水分和养分,提高植物的抗旱、抗寒和抗病能力。研究表明,磷肥施用可以促进根系分泌物的产生,改善土壤环境,促进根际微生物的活动,从而间接促进养分吸收。反之,磷缺乏会导致根系发育不良,吸收能力下降,影响整体生长,降低马铃薯的抗逆性,使其更容易遭受病虫害和环境胁迫的影响^[7]。

1.2.4 参与信号转导和调控生长发育

磷参与植物体内多种途径信号转导,调控植物的生长发育过程,如开花、结实等。一些磷酸化的蛋白参与植物对环境刺激的响应,如光、温度、病原菌等。

1.3 缺磷对植物的影响

研究表明,缺磷会导致植物的根系发育不良、株型矮小、叶片呈现紫色,并且影响光合作用及碳水化合物的合成,从而显著降低产量和品质^[8];也有研究发现,在低磷条件下,植物的逆境应答机制会被激活,增强植物对干旱、盐碱等逆境的耐受能力^[9-10]。植物根系通过多种策略提高磷素获取能力,包括根系形态可塑性调节、根际酸性磷酸酶分泌及与丛枝菌根的共生等^[11],这些适应性机制使植物能够在磷素匮乏环境中维持相对稳定的生长。

2 马铃薯磷素吸收利用机制

马铃薯组织中,磷素主要以有机磷化合物的形式存在,如磷脂、核酸和磷酸糖等。由于地区、

品种和生育时期的差异,马铃薯块茎中磷素含量有细微差别,通常在0.1%~0.5%,高磷品种可达到0.4%以上,低磷品种仅为0.2%左右。一般来说,马铃薯幼嫩组织中磷素含量较高,随着植株生长逐渐降低。

马铃薯磷吸收主要依赖根系对土壤中溶解性磷的吸收,根际磷的有效性受多种因素影响,包括土壤pH值、土壤有机质含量、微生物活性及根系分泌物等。目前研究表明,马铃薯根系通过高亲和性磷转运蛋白(High-affinity phosphate transporters, HPTs)吸收土壤中的磷酸根离子,这些HPTs属于PHT1家族,其基因表达受磷营养水平的调控。低磷胁迫下,马铃薯HPTs基因表达量上调,从而提高磷吸收能力,已有研究鉴定出多个马铃薯PHT1基因家族成员,并对其功能进行了初步探究,例如StPHT1、StPHT1;2、StPHT1;7等,然而,不同PHT1基因成员在磷吸收中的作用及其协同调控机制仍需深入研究。马铃薯根系通过分泌有机酸、酶类及根际微生物,共同作用增强对土壤中难溶性磷的利用率。研究发现,马铃薯根系特有的樱桃酸、草酸等有机酸可以有效溶解土壤中的不溶性磷,从而提高磷的生物有效性。此外,磷素的吸收也与植物的根系形态及微细结构密切相关,细根与根毛的生长能够提高磷素的吸收能力^[12]。

2.1 马铃薯的磷转运机制

磷吸收后,需要通过维管束系统转运到地上部分,目前的研究表明,磷在植物体内的转运主要依靠木质部和韧皮部的协同作用,木质部主要负责将根系吸收的磷运输到地上部分,而韧皮部则参与磷在植物体内的再分配^[13]。已有一些研究关注磷在木质部和韧皮部中的转运蛋白,如在拟南芥中,AtPht1;1和AtPht1;4负责吸收土壤中的磷,AtPht1;5负责将磷运送到库、AtPht1;8和AtPht1;9负责在根系中输送转移磷^[14]。此外,磷在不同器官之间的分配也受到植物生长发育阶段和环境条件的影响,例如,在块茎膨大期,大量的磷会优先分配到块茎中,以满足块茎的生长需求,深入研究磷分配调控机制,对于提高马铃薯块茎磷含量和品质至关重要。

研究表明,磷酸盐转运蛋白(PHT)在磷的吸收、转运和再分配过程中发挥着关键作用,且不同PHT基因在马铃薯不同组织器官中的表达模

式存在差异,并受磷营养水平的调控^[15]。

2.2 影响马铃薯磷素吸收利用的主要因素

2.2.1 土壤肥力状况

土壤中磷素含量过低或者以不易被植物吸收的形式存在,都会限制马铃薯对磷素的吸收和利用,合理施用磷肥可以有效提高土壤磷素供给能力,促进马铃薯磷素的吸收。此外,土壤pH值也会通过影响磷素的化学形态从而间接影响马铃薯对其的吸收,一般来说,酸性土壤不利于磷素的植物吸收,而中性或微碱性土壤更有利于磷素的转化和利用。

2.2.2 品种遗传差异

不同马铃薯品种在根系发达程度、根系分泌物、磷素代谢等方面存在差异,从而表现出对磷素的吸收利用能力不同。近年来,通过遗传育种手段培育出一些高磷品种,为提高马铃薯磷素营养质量提供了新的可能。

2.2.3 环境因子

环境因素如光照、温度、水分等间接影响马铃薯生理代谢过程从而影响对磷素的吸收转运。合理的栽培管理措施如合理的施肥、灌溉都可以在一定程度上优化马铃薯的磷素营养状况。

2.3 提高马铃薯磷素利用效率的策略

2.3.1 合理施用磷肥,提高土壤磷素供给水平

可根据不同土壤条件选择适宜的磷肥种类和施用量,磷肥的施用是提升马铃薯产量的重要环节。研究表明,适量施用磷肥能够显著提高马铃薯的单产,同时,磷肥的施用不仅影响地上部分的生长,还对根系的发育起到促进作用^[16-17]。在不同生长阶段施用磷肥的效果也具有明显的差异,如在马铃薯苗期施用能显著促进幼苗生长,而晚期施用则对块茎的发育和淀粉积累更为有效^[18]。研究还表明,施用磷肥的同时配合其他微量元素如锌、铁等,可以进一步提高马铃薯的产量和品质^[19]。

2.3.2 选育高磷吸收利用效率的马铃薯新品种

利用常规育种或分子育种技术(基因组选择、分子标记辅助选择等)选育出根系发达、磷素代谢高效的优质品种。

2.3.3 采取合理的栽培管理措施

轮作、间作和覆盖作物的栽培方式被认为能够改善土壤结构和提高土壤中磷素的有效性。此外,生物肥料的应用,如施用含磷微生物的肥

料,也显示出能够提高马铃薯对磷的利用率,为马铃薯生长创造有利条件,促进其对磷素的吸收利用^[20]。

2.3.4 土壤改良

改良土壤结构,提高土壤养分有效性,如采用秸秆还田、有机肥施用等措施可以改善土壤磷素营养状况,提高马铃薯磷素利用效率。通过施用石灰、酸性调节剂等方式调节土壤酸碱度,也可促进磷素的转化和植物吸收。

3 马铃薯磷素营养研究展望

尽管马铃薯磷素营养研究取得了显著进展,但仍存在许多挑战和机遇。未来研究方向包括:1)深入研究磷素高效吸收利用的分子机制,以进一步解析磷信号转导途径、磷转运蛋白的结构和功能及磷饥饿响应机制;2)开发缓释型、控释型等新型磷肥,提高磷肥利用效率,减少环境污染;3)利用 CRISPR-Cas9 等基因编辑技术,精准提高马铃薯磷素吸收利用效率,培育高磷效率的优良品种;4)整合转录组学、蛋白质组学、代谢组学等组学技术,对马铃薯磷素营养进行系统研究,揭示其复杂的调控网络,以提高马铃薯块茎产量及改善品质。

参考文献:

[1] 屈冬玉,谢开云,金黎平,等.中国马铃薯产业发展与粮食安全[J].中国农业科学,2005,38(2):358-362.

[2] 程功,焦洁洁,蒋建潮,等.植物对氮磷亏缺的生长及生理、分子响应研究进展[J].湖北林业科技,2024,53(5):65-72.

[3] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:495-496.

[4] 王明川,汤智德,谢安强,等.低磷胁迫时混合内生真菌对杉木幼苗的促生作用[J].东北林业大学学报,2025,53(1):1-9.

[5] LI P L, WENG J Y, ZHANG Q, et al. Physiological and biochemical responses of cucumis melo L. chloroplasts to low-phosphate stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1525.

[6] NIU Y F, CHAI R S, JIN G L, et al. Responses of root architecture development to low phosphorus availability: a review[J]. Annals of Botany, 2013, 112(2): 391-

408.

[7] 刘荣,李兵杰,王智焯.植物响应缺磷胁迫的分子机制研究进展[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2024,50(3):455-468.

[8] YAN N, ZHANG Y L, XUE H M, et al. Changes in plant growth and photosynthetic performance of zizania latifolia exposed to different phosphorus concentrations under hydroponic condition[J]. Photosynthetica, 2015, 53(4): 630-635.

[9] RYAN P, DELHAIZE E, JONES D. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2001, 52: 527-560.

[10] WASAKI J, YAMAMURA T, SHINANO T, et al. Secreted acid phosphatase is expressed in cluster roots of lupin in response to phosphorus deficiency [J]. Plant and Soil, 2003, 248(1): 129-136.

[11] KAFLE A, COPE K R, RATHS R, et al. Harnessing soil microbes to improve plant phosphate efficiency in cropping systems [J]. Agronomy, 2019, 9(3): 127.

[12] 曹敏轩.马铃薯磷转运蛋白相关基因 StPHT1;7 的克隆和功能分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.

[13] MIMURA T. Regulation of phosphate transport and homeostasis in plant cells [J]. International Review of Cytology, 1999, 191(08): 149-200.

[14] LAPIS-GAZA H R, JOST R, FINNEGAN P M. Arabidopsis phosphate transporter1 genes PHT1;8 and PHT1;9 are involved in root-to-shoot translocation of orthophosphate [J]. BMC Plant Biology, 2014, 14(1): 334.

[15] LIU B L, ZHAO S, WU X F, et al. Identification and characterization of phosphate transporter genes in potato [J]. Journal of Biotechnology, 2017, 264: 17-28.

[16] 苏明,吴佳瑞,洪自强,等.西北半干旱区马铃薯块茎淀粉形成及产量对磷肥减量的响应[J].作物学报,2025,51(3):713-727.

[17] 苏木德.磷肥用量对马铃薯农艺性状、产量和品质的影响[J].福建农业科技,2023,54(2):73-77.

[18] 程瑶.不同磷用量对马铃薯产量和品质的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2021:55-57.

[19] 冯剑.磷钾调控对冬作马铃薯钙镁锰营养特性及养分平衡的影响[D].广州:华南农业大学,2017:50-52.

[20] 戈应同,王宇蕴,徐翔,等.有机肥增强植物磷素吸收利用机制研究进展[J].中国土壤与肥料,2024(7): 228-235.