

doi: 10.19928/j.cnki.1000-6346.2021.1033

马铃薯硫素营养研究进展

刘坤¹ 贾立国¹ 秦永林¹ 于静¹ 石晓华¹ 李利² 樊明寿^{1*}¹ 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019; ² 山西大同大学生命科学学院, 山西大同 037009)

摘要: 硫是植物必需的矿质营养元素, 在马铃薯生长发育中发挥重要作用, 不可替代。本文从硫素生理功能、对马铃薯生长发育及产量和质量的影响、与其他营养元素互作以及营养特点等方面, 总结了近几年国内外研究进展, 并提出了未来马铃薯硫素营养研究的几个重点方面, 期望为马铃薯养分管理技术优化提供信息。

关键词: 马铃薯; 硫; 产量; 质量; 互作; 施肥; 综述

马铃薯是我国重要的粮、菜、经济作物, 其种植面积与总产量均位列全球之首(秦永林等, 2019)。在国家粮食短缺的年代, 马铃薯在保障国家粮食安全、促进地方经济发展、增加农民收入等方面发挥着重要的作用。近几年, 随着马铃薯种植面积不断扩大, 化肥投入量, 特别是氮、磷、钾等大量元素的投入逐年增加, 而中微量元素肥料的施用并没有得到有效的重视, 加上含硫燃料和农药的限制使用, 含硫肥料被高浓度不含硫或者少含硫的化肥大量替代, 导致土壤中硫的含量日益减少(冯琰, 2006)。据报道, 目前世界各地包括六大洲 72 个国家均有过土壤缺硫现象, 我国土壤缺硫有扩展的趋势(冯琰, 2006)。硫素是马铃薯生长发育必需的营养元素之一, 它对植物的影响仅次于氮、磷、钾(刘存辉等, 1998; 李海云等, 2009), 但是对马铃薯硫素营养的研究远远落后于氮、磷、钾等大量元素。本文结合国内外马铃薯硫素营养研究进展, 就马铃薯硫素生理功能、产量和质量评价、元素交互作用以及营养特点等方面进行详细综述, 以期对马铃薯硫素的养分管理提供指导和参考。

刘坤, 男, 博士, 讲师, 主要从事马铃薯营养生理及养分管理方面研究工作, E-mail: liukun261@163.com

*通信作者(Corresponding author): 樊明寿, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养生理的教学和研究工作, E-mail: fmswh@126.com

收稿日期: 2021-05-08; 接受日期: 2021-06-23

基金项目: 内蒙古科技计划项目(2019GG248), 内蒙古自治区科技成果转化专项(2019CG030), 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT-20-B16), 内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目(NDYB2019-17)

1 硫素的生理功能以及缺素症状

硫在植物组织中的含量约占植物干质量的 0.1%~0.5%, 平均 0.25% 左右(浙江农业大学, 1991)。马铃薯块茎干物质中, 硫的变化范围为 1.2~2.8 g·kg⁻¹(Klikocka et al., 2015)。作物对硫素的需求受其本身合成蛋白质数量和质量要求的影响, 不同作物同一部位, 同一作物不同发育阶段对硫素的需求各不相同(Dijkshoorn & Wijk, 1967)。植物体中的硫可分为有机硫和无机硫, 有机硫多以蛋白质的形式存在, 而无机硫则多以硫酸根(SO₄²⁻)形式存在, 根部吸收的硫通过蒸腾拉力运输到地上部叶片中, 在叶绿体中被还原为有机硫化物, 供植物体生长和发育。在土壤溶液中, 硫元素能够被植物根部吸收利用的主要形式是 SO₄²⁻ 离子, SO₄²⁻ 离子能够随着土壤中物质的流动而移动, 当土壤 pH 值很高时(大于 7)或根部吸收较慢时, 硫被沉淀为 CaSO₄, 植物难以吸收利用。

在植物体内, 硫的生理功能主要包括以下几个方面: ① 硫是蛋白质和酶的组成元素, 一般蛋白质含硫 0.3%~2.2%, 如果硫不足, 蛋白质中缺少含硫氨基酸(特别是蛋氨酸)。硫也是许多巯基(-SH)酶的成分, 如丙酮酸脱氢酶、脂肪酶等, 这些酶参与植物呼吸作用, 与碳水化合物、脂肪和氮代谢作用密切相关。② 硫存在于某些生物活性物质中, 如辅酶 A、铁氧还蛋白、硫胺素及谷胱甘肽等。辅酶 A 含有巯基, 广泛参与植物三大营养物质代谢, 乙酰辅酶 A 是辅酶 A 的主要活性形式;

铁氧还蛋白作为电子载体,不断以还原型-氧化型的转化促进植物的代谢作用;适量硫胺素能促进植物根系的生长。③ 硫参与固氮过程。构成固氮酶的钼铁蛋白和铁蛋白中均含有硫。施用硫肥能促进豆科作物形成根瘤,增加固氮量。④ 硫参与植物对外界环境的应答反应,如毒害解除、免疫防御、抗病抗逆等(浙江农业大学,1991)。

硫在植物体内可以移动,但是这种移动十分有限,很难从衰老组织向幼嫩组织转运,所以缺硫症状首先表现在植物的幼嫩器官。硫素的转运取决于该部位细胞组织的硫素状况以及其他部位对硫素的需求,通常情况下,硫素不发生移动,只有在代谢加强或者是硫胁迫发生时才会出现硫的转移。植物缺硫表现为蛋白质、叶绿素的合成受阻,作物生长受到严重障碍,茎秆较细且僵直,叶片褪绿或黄化,或因花色素苷积累而发红,植株矮小瘦弱(李合生,2019)。马铃薯缺硫后,植株生长缓慢,叶片、叶脉普遍黄化,与缺氮类似,但叶片并不提前干枯脱落,黄化现象首先出现在幼嫩叶片上。缺硫严重时,叶片上会出现褐色斑点。导致马铃薯缺硫的原因主要是施肥不当,首先是对硫肥的不重视或盲目施用,其次是过多施用重过磷酸钙,还有就是长期或者连续施用不合格硫肥,易出现缺硫。施用含硫肥料,如硫酸铵、硫酸钾、硫酸钾型复合肥等,可缓解缺硫症状(鲁剑巍和李荣,2010)。

2 硫素对马铃薯产量与品质的影响

适量施硫可以提高马铃薯块茎产量,增强块茎抗疮痂病的能力,同时还能够明显改善马铃薯块茎品质如可溶性糖、VC以及还原糖含量等(邴海龙,2008)。与不施硫磺的常规施肥相比,增施30 kg 硫磺可提高马铃薯商品薯率3.8个百分点,净增收最多可达9.8%(王惠珠,2020)。增施硫肥可在一定程度上提高马铃薯产量及VC、可溶性糖、蛋白质含量,降低马铃薯淀粉、还原糖含量(冯琰,2006)。张锡洲和李廷轩(2000)研究表明,硫是含硫氨基酸(如甲硫氨酸、半胱氨酸等)的组成成分,因而施用硫肥能够提高冬小麦籽粒和水稻中蛋白质含量,改善品质。Elomre等(2007)研究发现,马铃薯缺硫后,块茎中一些游离氨基酸含量普遍升高,其中丙氨酸、苏氨酸、丝氨酸以及组氨

酸等氨基酸的含量提高近5倍。另外,Elomre等(2007)也认为硫的缺乏会引起马铃薯体内果糖含量显著升高,葡萄糖含量从 $1.74 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $7.81 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,蔗糖浓度也有轻微提升,但不显著,而块茎中有毒物质丙烯酰胺积累量明显减少,究其原因,可能是丙烯酰胺的前体天冬氨酸含量下降,限制了丙烯酰胺的形成。此外,Eppendorfer和Eggum(1994)还研究发现,马铃薯块茎干物质质量在施硫后明显提高,而块茎可溶性膳食纤维、不溶性膳食纤维以及总膳食纤维百分含量在施硫后明显降低。

研究发现,马铃薯产量与块茎形成期氮硫积累量的比值呈显著负相关(邴海龙,2008)。高氮情况下施硫,马铃薯减产和品质下降问题得以大幅度缓解,全生育期内马铃薯叶片叶绿素含量显著增加,叶片光合特性得以改善,光合产物积累;而在低氮条件下施硫,马铃薯苗期叶片硝酸还原酶活性显著提高,幼苗对氮素的吸收增强。此外,硫氮配施还可以增加马铃薯株高(邴海龙,2008)。Muttucumaru等(2013)研究发现,氮与硫的配施能影响马铃薯块茎游离氨基酸、糖类以及丙烯酰胺的合成过程,其中,氮供应显著影响块茎丙烯酰胺的合成,但这种作用与马铃薯品种有关,大多数马铃薯品种中丙烯酰胺的合成量与氮的供应成正比。

硫素提质增产的原因是多方面的。首先,硫能够参与作物体内氧化还原过程,促进叶片叶绿素和叶绿体的形成,提高叶绿素含量,尤其是叶绿素a含量(邴海龙,2008)。其次,硫能够增强作物叶片中RuBP羧化酶、PEP羧化酶以及硝酸还原酶的活性,提高作物光合能力,利于有机物的积累(谢瑞芝等,2002)。第三,硫是一些生理活性物质的组成成分,如硫胺素、VH等,这些物质参与调节植物的生长发育进程,促进植物的生理代谢。另外,作物中含硫巯基数量增多,能增强植株耐寒和耐旱性,植株对不良环境的抵御能力进一步提高(李玉颖,1992)。

3 马铃薯硫素与其他营养元素间的相互作用

3.1 硫对马铃薯氮素代谢的影响

硫与大量营养元素间存在较为明显的互作关

系,合理施硫可以促进马铃薯各器官氮、磷、钾营养元素的积累,其中,每 667 m^2 施用纯硫 $1.5\sim 4.5\text{ kg}$ 效果最好(郇海龙,2008)。硫素与氮素都是组成植物体蛋白质的重要组分,硫素形成固氮酶系统铁氧还蛋白的铁硫中心,促进氮素代谢和糖分供应,利于生物固氮,故硫素与氮素的代谢密切相关(周卫和林葆,1997)。缺硫会降低氮肥肥效,加剧土壤中氮的流失,同样缺硫会降低植物硝酸还原酶活性,阻碍蛋白质合成,提升植物体内非蛋白氮含量(郇海龙,2008)。缺硫时,植株对氮素的吸收被抑制,氮代谢及蛋白质合成受阻,全氮含量显著降低(刘勤等,2000),硝态氮含量降低最为明显,氮代谢中间产物(硝态氮和铵态氮)过量积累(郇海龙,2008);缺氮时,老叶先出现缺硫症状,叶片可溶性硫积累增多,氮代谢紊乱(Clement & Gessel, 1985; Eppendorfer & Eggum, 1994; 郇海龙,2008)。过量施硫后,植株中上部幼叶全氮含量增加,而下部老叶氮素被分解和转运,含量无明显增加(刘勤等,2000)。

在植物生理代谢过程中,硫和氮有着相似的作用,尤其是在蛋白质合成方面关系密切,表现为高度的互作。要想得到施用氮的最佳反应,提供适量的硫素是必需的,且在作物快速生长期,保持充足的硫素供应,对氮的吸收也是必要的(刘荣,1994)。大多数作物所需的氮、硫比例(N/S)是 $15:1$,经过研究发现,紫花白、底西瑞和夏波蒂等马铃薯品种生育期植株生长所需的N/S范围一般在 $(6\sim 22):1$ 之间,底西瑞生育期内N/S最高能达到 $25:1$,紫花白N/S随生育进程的推进呈“高一低一高一低”的变化趋势,而底西瑞和夏波蒂品种的N/S随生育进程的推进呈波状变化(冯琰等,2008)。另外,马铃薯氮素的积累与硫素的积累之间存在着极显著的幂函数关系,即马铃薯氮素的积累量随硫素积累量的增加而呈幂函数增加(刘荣,1994;冯琰等,2008)。

氮、硫配合施用,植株对氮、硫的吸收量明显高于单独施用(吴巍等,1997),与单施 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥相比, $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮和 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的硫配施组合可以明显改善马铃薯的外形和品质,如种薯出苗率、株高、块茎还原糖含量、单株结薯数、块茎干物质质量及产量等,说明硫素提高了马铃薯对

氮的吸收和利用效率。另外,马铃薯株高增加的原因,可能是氮硫配施增强了植株对氮素的吸收,促使细胞延伸变大,增强细胞分裂,最终加快马铃薯生长(Singh et al., 2015)。

3.2 硫对马铃薯磷、钾素代谢的影响

磷、钾与硫元素间也具有明显的交互作用,增施硫肥可以促进马铃薯对磷的吸收,提高各器官中磷素含量 $0.30\%\sim 23.49\%$,提高磷素积累量 $1.50\%\sim 22.38\%$ (冯琰,2006)。马铃薯块茎在不同硫供应形式下对磷的吸收效率均很高,磷对硫的供应尤为敏感,且土壤 $\text{SO}_4\text{-S}$ 含量与马铃薯块茎磷素吸收量和积累量呈显著正相关(Klikocka et al., 2015)。研究发现,紫花白、底西瑞和夏波蒂等马铃薯品种生育期磷、硫比例(P/S)范围一般在 $(1\sim 5):1$ 之间,底西瑞生育期内P/S最高能达到 $6.3:1$,随着生育进程的推进,紫花白和夏波蒂P/S的变化趋势均为波状曲线,而底西瑞P/S呈现“高一低一高一低”的变化趋势。另外,马铃薯磷素的积累量随硫素积累量的增加而呈幂函数增加(冯琰,2006)。

另外,增施硫肥可以促进马铃薯对钾的吸收,增加各器官中钾素含量 $6.67\%\sim 125.00\%$,提高钾素积累量 $11.97\%\sim 131.91\%$,且每 667 m^2 施硫肥 1.5 kg 效果最佳(冯琰,2006)。与不施钾、硫的对照相比, $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的钾和 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的硫配施组合可显著改善马铃薯块茎的营养品质、商品品质以及储藏品质,提高块茎对氮、磷、钾和硫元素的吸收和利用,增加块茎氮、磷、钾和硫的含量(Rather et al., 2021)。研究发现,紫花白、底西瑞和夏波蒂等马铃薯品种在整个生育期内钾、硫比例(K/S)变化趋势均为波状曲线,只是波峰和波谷出现的次数和时期不同。同样,马铃薯钾素与硫素积累量间存在极显著幂函数关系,即钾素的积累量随硫素积累量的增加而呈幂函数增加(冯琰,2006)。此外,钾硫配施还能增强作物的钾肥利用率(鲁剑巍等,1994;冯琰,2006)。然而,有些学者持不同态度,在温室培养条件下,当培养液中钾浓度一定时,随着硫浓度的升高,马铃薯叶片钾浓度逐渐降低;而当硫浓度一定时,随着钾浓度的升高,叶片硫浓度并没有明显的变化,说明马铃薯硫素和钾素间存在一定的拮抗作用,结果不一致的原因可能与

马铃薯的培养条件和两种营养元素的供应浓度有关 (Moinuddin & Umar, 2004)。

3.3 硫对马铃薯中微量元素代谢的影响

硫也能够参与到中微量元素代谢过程。施硫能提高马铃薯块茎干物质中钙、镁含量,随着施硫量增加,块茎钙、镁含量逐渐增多,与不施硫相比,施硫 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时钙、镁含量达到最高;且块茎镁含量对不同施硫形式敏感性不同,与施用含硫无机盐 (K_2SO_4) 相比,块茎中镁含量对施硫磺的响应更为敏感 (Klikocka & Glowacka, 2013)。但也有学者认为,施硫后块茎中钙、镁含量较低,且随施硫量增加钙镁含量变化不明显 (Ryant et al., 2008)。结果存在差异的原因可能与马铃薯的栽培条件及硫素的供应水平有关。另外,增施硫肥可提高马铃薯根、茎、叶中硫的含量及积累量,分别提高 $0.90\% \sim 25.61\%$ 和 $0.17\% \sim 30.61\%$,但却降低了块茎中硫的含量和积累量,降幅分别为 $10.31\% \sim 34.35\%$ 和 $25.00\% \sim 29.50\%$ (冯琰, 2006)。

马铃薯块茎中微量元素的含量也与硫肥的供应密切相关,随着硫供应量增加,块茎对铁元素的吸收增强,而对锰的吸收减弱,与不施硫相比,在施硫 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时块茎对铜和锌的吸收率及积累量达到最大 (Klikocka, 2011)。另外,块茎对铜、锌、锰元素的吸收受土壤 pH 值的影响, pH 值越高,块茎对铜的吸收越慢,而对锌的吸收越快。硫影响马铃薯对微量元素的吸收可能的原因是,硫的供应会显著降低土壤 pH 值,进而间接地改变块茎对铜、锌、锰等微量元素的吸收 (Klikocka, 2011)。也有研究发现,马铃薯块茎中硫与镉元素间存在一定的拮抗关系,虽然在施用硫酸铵后,马铃薯块茎中总镉含量没有明显变化,但施用 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 元素硫后,块茎中镉含量降低 30% 。另外,马铃薯植株脂质中镉含量在施硫后也显著降低,而蛋白和可溶性糖中镉的含量则变化不明显,原因可能与硫增加了镉在蛋白和可溶性糖中的积累有关 (Ryant et al., 2008)。

4 马铃薯硫素营养及施肥

研究表明,马铃薯在生育前期茎叶含硫量最高,含量为 $0.15\% \sim 0.45\%$,生育后期以根和块茎

为主,其中根的含硫量为 $0.2\% \sim 0.3\%$,块茎含硫量变化范围为 $0.06\% \sim 0.20\%$ 之间。马铃薯在出苗后 40 d 时,硫素积累量已达全生育期吸硫总量的一半以上,出苗后 95 d 时,硫素积累量达到最大,块茎中硫的积累吸收量随块茎干物质量的增加而增加,收获时达到最大 (冯琰等, 2006)。块茎形成期至块茎膨大期是马铃薯生育期中硫素吸收速率最快、吸收数量最多的时期,且随着生长中心转移,硫在马铃薯各器官中的分配也发生相应的变化,块茎膨大期之前叶片中分配最多,茎秆其次,块茎中最少;块茎膨大期之后则是块茎中最多,其次是茎秆,叶片中最少。叶片中硫的分配率随生育进程逐渐降低,而块茎中硫的分配率随生育进程呈线性增长,茎秆中硫的分配率变化为单峰曲线,峰值出现在块茎形成期,另外,每生产 500 kg 块茎需吸收硫 0.13 kg (冯琰等, 2006)。

土壤中硫的主要形态有含硫矿物、土壤溶液中的硫酸盐、吸附性硫酸盐及有机硫化物 (刘崇群, 1981)。马铃薯从土壤中吸收硫素的过程是逆浓度梯度的主动吸收,主要以硫酸根 (SO_4^{2-}) 和部分亚硫酸根 (SO_3^{2-}) 的形式进入马铃薯植株体内。马铃薯对硫素的吸收受到土壤类型、土壤质地、硫肥种类、外界溶质和根系细胞中硫素的浓度等因素的影响。我国南方酸性红壤土因含有较多的铁、铝水氧化物,使土壤胶体表面带有一定量的正电荷,对 SO_4^{2-} 具有吸附保蓄作用,避免了过多的淋洗,从而提高了植物对硫的吸收效率; SO_4^{2-} 是植物可直接吸收利用的形态,对当季作物有效性高,而元素硫 (俗称硫磺) 虽然含硫量较高,但在土壤中需氧化为 SO_4^{2-} 才能被植物吸收利用,而这种转化在某些地区一般需要 3~4 周;硫素供应充足,植物细胞质中硫的浓度高,吸收的速度放慢,硫素在植株体内的积累速度减缓 (王庆仁和林葆, 1996; 谢瑞芝等, 2002); 因此,由于硫素营养特点的特殊性,马铃薯施用硫素时必须考虑气候、土壤、肥料类型、外界和自身硫浓度,防止化肥不科学施用,提高硫肥的利用效率。

5 展望

硫作为一种重要的中微量元素,在植物的生命活动中起重要的作用。但过去由于硫素作为其

他肥料的副成分被带入农田,使作物未表现出明显缺硫,因此很少有学者专门研究农业生产中硫的问题。随着马铃薯生产水平的不断提高和氮、磷、钾三要素施用量的不断增加,土壤中微量元素缺乏越来越明显,各种养分的不平衡已成为马铃薯产量质量提高的重要限制因素,基于此类问题,建议未来对马铃薯硫素营养开展以下研究:

① 根据已有研究报道,深入探究马铃薯硫元素与其他营养元素间互作的生理基础及其机制,明确营养元素间的协同与拮抗规律,合理配施硫肥与其他营养元素肥料,提高马铃薯对硫肥的吸收效率,从而实现马铃薯优质高产。

② 结合马铃薯对硫素的需求特点和各生育阶段硫素吸收、转运、调控及分配规律,提出调控马铃薯产量和质量的最佳硫肥管理策略。

③ 针对不同土壤类型、土壤条件、硫肥种类及外界硫浓度条件下马铃薯硫素吸收的差异,对马铃薯硫肥的施用方法和技术进行创新,建立适用于不同土壤和外界条件下的马铃薯施硫模式,最终实现硫素的高效利用。

参考文献

- 冯琰. 2006. 马铃薯不同品种硫素吸收分配规律的研究(硕士论文). 呼和浩特: 内蒙古农业大学.
- 冯琰, 蒙美莲, 尚国斌, 穆青坡. 2006. 马铃薯硫素吸收规律的初步研究. 中国马铃薯, (2): 81-85.
- 冯琰, 蒙美莲, 马恢, 张瑞玖. 2008. 马铃薯不同品种氮、磷、钾与硫素吸收规律的研究. 中国马铃薯, (4): 205-209.
- 郇海龙. 2008. 硫对马铃薯产量和品质的影响及其生理基础研究(硕士论文). 呼和浩特: 内蒙古农业大学.
- 李海云, 张复君, 齐辉, 赵燕. 2009. 植物硫营养研究进展. 北方园艺, (7): 143-145.
- 李合生. 2019. 现代植物生理学. 4版. 北京: 高等教育出版社: 58-59.
- 李玉颖. 1992. 硫在作物营养平衡中的作用. 黑龙江农业科学, (6): 37-39.
- 刘崇群. 1981. 土壤硫素和硫肥施用问题. 土壤学进展, (4): 11-19.
- 刘存辉, 董树亭, 胡昌浩. 1998. 硫在作物增产中的作用研究进展. 山东农业大学学报, 29(1): 121-124.
- 刘勤, 赖辉比, 曹志洪. 2000. 不同供硫水平下烟草硫营养及对N、P、Cl等元素吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 6(1): 63-68.
- 刘荣. 1994. 施用硫肥对氮肥肥效的影响. 黑龙江农业科学, (5): 50.
- 鲁剑巍, 陈防, 陈行春, 宁昌会, 许幼生. 1994. 钾、硫肥配施对作物产量与品质的影响. 土壤通报, 25(5): 216-218.
- 鲁剑巍, 李荣. 2010. 马铃薯常见缺素症状图谱及矫正技术. 北京: 中国农业出版社: 48-55.
- 秦永林, 樊明寿, 石晓华, 贾立国, 于静. 2019. 马铃薯产业扶贫面临的问题与对策. 蔬菜, (10): 78-82.
- 王惠珠. 2020. 马铃薯施硫效应研究. 农业科技通讯, (7): 155-160.
- 王庆仁, 林葆. 1996. 植物硫营养研究的现状与展望. 土壤肥料, (3): 16-19, 29.
- 吴巍, Schoenau J J, 钱佩源, Grear K J. 1997. 氮硫对小麦产量及养分吸收的影响. 吉林农业科学, (1): 68-71.
- 谢瑞芝, 董树亭, 胡昌浩. 2002. 植物硫素营养研究进展. 中国农学通报, 18(2): 65-69.
- 张锡洲, 李廷轩. 2000. 对四川土壤硫素资源及硫肥施用问题的浅析. 四川农业大学学报, 18(2): 183-185, 192.
- 浙江农业大学. 1991. 植物营养与肥料. 北京: 中国农业出版社.
- 周卫, 林葆. 1997. 土壤与植物中硫行为研究进展. 土壤肥料, (5): 8-11.
- Clement A, Gessel S P. 1985. N, S, P status and protein synthesis in the foliage of Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) and Austrian black pine (*Pinus nigra* Arnold var. nigra). Plant & Soil, 85(3): 345-359.
- Dijkshoorn W, Wijk A. 1967. The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter a review of published data. Plant & Soil, 26(1): 129-157.
- Elmore J S, Mottram D S, Muttucumaru N, Dodson A T, Parry M, Halford N G. 2007. Changes in free amino acids and sugars in potatoes due to sulfate fertilization and the effect on acrylamide formation. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 55(13): 5363-5366.
- Eppendorfer W H, Eggum B O. 1994. Effects of sulphur, nitrogen, phosphorus, potassium, and water stress on dietary fibre fractions, starch, amino acids and on the biological value of potato protein. Plant Foods for Human Nutrition, 45(4): 299-313.
- Klikocka H. 2011. The effect of sulphur kind and dose on content and uptake of micro-nutrients by potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus, 10(2): 137-151.
- Klikocka H, Głowacka A. 2013. Does the sulphur fertilization modify magnesium and calcium content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.)? Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus, 12(5): 41-53.
- Klikocka H, Kobiałka A, Juszczyk D, Głowacka A. 2015. The influence of sulphur on phosphorus and potassium content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). Journal of Elementology, 20(3): 621-629.
- Moinuddin S A, Umar S. 2004. Influence of combined application of

- potassium and sulfur on yield, quality, and storage behavior of potato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35 (7-8): 1047-1060.
- Muttucumar N, Powers S J, Elmore J S, Mottram D S, Halford N G. 2013. Effects of nitrogen and sulfur fertilization on free amino acids, sugars, and acrylamide-forming potential in potato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (27): 6734-6742.
- Rather M A, Chattoo M A, Bhat T A, Mushtaq F, Rashid M, Shah M, Sultan A. 2021. Influence of different levels of sulphur and potassium and their interactions on different quality and storage parameters of potato. *International Journal of Plant & Soil Science*, 33 (3): 38-46.
- Ryant P, Dolezelova E, Fabrik I, Baloun J, Adam V, Babula P, Kizek R. 2008. Electrochemical determination of low molecular mass thiols content in potatoes (*Solanum tuberosum*) cultivated in the presence of various sulphur forms and infected by late blight (*Phytophthora infestans*). *Sensors*, 8 (5): 3165-3182.
- Singh H, Sharma M, Goyal A, Bansal M. 2015. Effect of nitrogen and sulphur on growth and yield attributes of potato (*Solanum tuberosum* L.). *International Journal of Plant & Soil Science*, 9 (5): 1-8.

Research Progress in Potato Sulfur Nutrition

LIU Kun¹, JIA Ligu¹, QIN Yonglin¹, YU Jing¹, SHI Xiaohua¹, LI Li², FAN Mingshou^{1*}

(¹College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China; ²College of Life Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, Shanxi, China)

Abstract: Sulfur is an essential mineral nutrient element in plant, and plays vital and irreplaceable function in potato growth and development. This paper summarized the research progress made at home and abroad in recent years including the aspects of sulfur physiological function; influence on potato growth and development, yield and quality; interaction with other nutrient elements and nutritional characteristic, etc. The paper also put forward several key aspects for future potato sulfur nutrient research, hoping to provide information for optimization of potato nutrient management technology.

Keywords: potato; sulfur; yield; quality; interaction; fertilization; review

· 封面说明 ·

速绿 117

天津科润蔬菜研究所育成的油亮型小白菜品种。株型直立、紧凑，外形美观，叶色深绿、亮泽，叶面平，无茸毛，叶片质地柔糯，长倒卵形，叶柄宽平、绿色，叶缘平；生长势特强，抗病性强，口感细嫩，品质佳，货架期长。

天津科润蔬菜研究所

地址：天津市西青区津静公路 17 公里处 电话：022-23369519

销售一部（白菜、青梗菜、青萝卜、茄果类产品事业部）

部长：王立宾 13821776178 经理：田立鹏 13622067680 王清源 3622072957

全国总代理：北京沃林 朱会山 13701184680