

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2023)04-0353-07

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2023.04.007

马铃薯养分需求及营养调控研究进展

王芳¹, 姚彬², 黄成东², 鲁振亚², 普正仙¹, 漆增连^{2*}

(1. 云南云天化股份有限公司研发中心, 云南 昆明 650228; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 科学施肥是提高马铃薯产量和品质的重要保障。目前, 生产过程中人们只注重大量元素的施用, 而忽略了中微量元素。与大量元素重要性相比, 中微量元素同样影响马铃薯的生长发育, 尤其对马铃薯块茎品质及植株抗逆性的提升具有重要作用。为明确大量元素氮、磷、钾, 中量元素钙、镁、硫, 微量元素硼、锌、锰、铜、铁、钼、氯对马铃薯生长发育、产量构成及块茎品质的影响, 文章综述了马铃薯生育期内对各营养元素的需求量以及其对马铃薯地上部生长、根系发育、产量和品质形成的重要调控作用, 同时对中微量营养元素施用方式进行比较, 以期马铃薯的复合肥产品创新及其养分高效利用提供理论依据。

关键词: 马铃薯; 营养元素; 块茎; 产量; 品质

Research Progress in Nutrient Requirements and Nutritional Regulation of Potato

WANG Fang¹, YAO Bin², HUANG Chengdong², LU Zhenya², PU Zhengxian¹, QI Zenglian^{2*}

(1. Research and Development Center, Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650228, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Scientific fertilizer application is an important guarantee to improve potato yield and quality. At present, however, more attentions are focused on the application of macro nutrients than second macro nutrients and micro nutrients. Compared with the importance of macro nutrients, second macro nutrients and micro nutrients also play important roles in potato growth and development, especially for both potato tuber quality and plant stress tolerance. In order to clarify the influence of macro nutrients nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), the second macro nutrients calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulphur (S), and micro nutrients boron (B), zinc (Zn), manganese (Mn), copper (Cu), iron (Fe), molybdenum (Mo) and chlorine (Cl) on the growth and development of potato, and further improve the yield and quality of potato tuber, the demand characteristic of these essential nutrients in potato plant, as well as the regulation of above-ground growth, root development, and yield and quality formation of potato tuber by essential nutrients were reviewed. At the same time, the application methods of the second macro nutrients and micro nutrients were compared. These would provide a scientific basis for the innovation of compound fertilizer for potato to achieve high quality and efficient production.

Key Words: potato; nutrient element; tuber; yield; quality

收稿日期: 2023-07-13

基金项目: 云南云天化股份有限公司研发中心项目(YTH-YF-2022-057); 云南省科技人才与平台计划(202305AF150055); 云南(昆明)院士专家工作站(YSZJGZZ-2022034)。

作者简介: 王芳(1980-), 女, 助理农艺师, 研究方向为新型肥料研制与应用。

*通信作者(Corresponding author): 漆增连, 博士研究生, 研究方向为新型肥料研制与应用, E-mail: 2357902354@qq.com。

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是重要的粮食兼蔬菜作物, 2015年国家开始实施马铃薯主粮化战略, 马铃薯成为中国“第四大主粮”^[1]。2020年, 中国马铃薯播种面积约为465.6万hm², 约占世界马铃薯播种面积的26%, 鲜食马铃薯产量1 831万t, 占世界马铃薯产量的22%, 播种面积和产量均居于全球首位^[2]。2010~2018年中国马铃薯单产水平稳步提升, 由16.2 t/hm²增长至19.7 t/hm², 然而与美国(49.8 t/hm²)、荷兰(36.6 t/hm²)、英国(35.9 t/hm²)等欧美发达国家仍有较大差距^[2]。造成单产差距较大的原因众多, 其中合理的化肥施用是关键因素之一, 而马铃薯生育期内对各种营养元素的需求特征又是合理施肥的重要基础。马铃薯生育期内所必需的营养元素主要有: 大量元素碳、氢、氧、氮、磷、钾, 中量元素钙、镁、硫, 微量元素硼、锌、锰、铜、铁、钼、氯。本文综述了马铃薯生育期内对氮、磷、钾、钙、镁、硫、硼、锌、锰、铜、铁、钼、氯元素的需求量及各营养元素对马铃薯地上部生长、块茎形成、块茎生长的调控作用, 以期对马铃薯复合肥产品创新及养分高效利用提供理论依据。

1 大量元素对马铃薯生长发育的调控作用

1.1 氮

氮素是马铃薯吸收最多的矿质营养元素之一, 充足的氮素供应有利于促进马铃薯生长发育以及实现马铃薯高产高值^[3]。研究表明, 马铃薯每生产1 000 kg块茎需要吸收氮含量为4.4~6.0 kg^[4]。

施用氮肥可以提高马铃薯块茎中有关淀粉合成酶的活性, 例如腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶、腺苷二磷酸焦磷酸化酶、可溶性淀粉合成酶、颗粒结合型淀粉合成酶及淀粉分支酶, 从而提高淀粉的积累; 但过高的氮肥施用量在生长中期会降低与淀粉合成相关基因的表达和与淀粉合成相关的酶活性^[5]。氮肥还能增加块茎中粗蛋白、维生素C含量, 提升块茎品质。作物生长的氮源主要分为铵态氮和硝态氮, 植物对硝态氮和铵态氮的吸收、运输、贮藏、同化等方面存在巨大差异, 这对植物的生理过程和生长发育有较大影响。然而, 关于马铃薯对不同氮素形态的响应机理, 国内外研究结果不

尽相同。有研究结果显示, 马铃薯生育期内供应硝态氮的块茎产量显著高于铵态氮供应, 且马铃薯长期施用铵态氮其生长会受到抑制, 因此认为马铃薯属于喜硝作物^[6,7]。也有研究证明, 相比于硝态氮、酰胺态氮和铵硝混合态氮处理, 铵态氮处理的马铃薯对氮吸收、积累与分配影响最大, 且马铃薯产量显著提高, 说明马铃薯为喜铵作物^[8,9]。然而, 苏亚拉其格等^[3]在砂培条件下, 以马铃薯生育期内块茎形成期为界, 分别在块茎形成前、后供应铵态氮和硝态氮, 结果表明, 在块茎形成前期供应铵态氮和硝态氮两种形态氮条件下, 马铃薯的株高、叶面积、叶片SPAD值、植物干物质积累等均无显著差异, 而块茎形成后期供应铵态氮马铃薯叶片SPAD值和马铃薯生长速度均显著高于硝态氮处理。唐铭霞等^[10]研究表明, 硝态氮肥能提高马铃薯结薯数量, 而增施铵态氮肥能促进马铃薯块茎膨大。综上, 氮素对马铃薯生长发育的影响十分复杂, 因此不能简单地将马铃薯归结为喜铵或喜硝作物, 需要根据马铃薯种植区域的土壤类型、气候条件及不同生育期, 具体选择氮素不同形态配伍, 有助于促进马铃薯地上部生长、产量形成和品质提升。例如, 在春天较冷的北方一作区或在南方酸性土壤种植区受气候及土壤条件的影响, 铵态氮的转化较为缓慢, 所以增施一定比例硝态氮有助于促进马铃薯氮素吸收。硝态氮肥容易随水淋失, 并且马铃薯块茎形成后期铵态氮肥的作用效果显著优于硝态氮肥, 因此在马铃薯块茎形成后期应当调整施肥策略, 以铵态氮供应为主则有助于提高马铃薯块茎产量和品质^[11]。

1.2 磷

磷是马铃薯生长发育所必需的营养元素之一, 尽管马铃薯对磷的需求量较少, 但磷对马铃薯的生长发育及块茎形成具有重要的作用^[12,13]。研究表明, 因马铃薯品种不同其每生产1 000 kg块茎需吸收磷含量通常在1.0~3.0 kg^[4]。

施用磷肥可显著提高马铃薯株高、茎粗, 促进地上部碳水化合物向块茎中转移, 可提高马铃薯生育后期根冠比^[14]。磷对马铃薯根系发育尤其是侧根发育意义重大, 并促进块茎的成熟, 可在一定程度上缓解因施氮过多造成的马铃薯晚熟。室内培养试

验表明, 低磷胁迫可促进马铃薯根系群体构建, 增加根系在培养基中的表面积, 提高根系吸收面积, 有效促进根系对磷的吸收^[15]。此外, 适量的磷素供应促进马铃薯根系生长的同时可提高马铃薯体内生物膜的稳定性, 有助于提高马铃薯植株对干旱的耐受能力^[16]。田间试验研究表明, 合理的磷肥用量可以提高马铃薯大中薯数、马铃薯产量^[17]及商品薯率。磷对马铃薯品质的提升主要体现在降低马铃薯块茎内支链淀粉比例但提高总淀粉含量^[18], 强化块茎淀粉羟基和磷酸盐间的脂化作用, 使淀粉粘结性增强, 提升淀粉品质^[19], 提高块茎中可溶性蛋白^[20]及维生素C含量^[21]。

1.3 钾

马铃薯是喜钾作物, 在整个生育期内对钾素的需求量相对较大^[22], 充足的钾素供应, 能够促进马铃薯植株生长发育, 增强马铃薯的抗逆性^[23]。马铃薯平均每生产1 000 kg块茎需吸收钾含量为7.9~13.0 kg^[4]。

植物对钾的吸收方式与氮、磷略有差异, 植物通过根系细胞吸收钾离子, 再运输到植物体内其他组织中^[24]。钾素可以促进植物根系生长、增强根系活力, 提高马铃薯植株光合效率, 影响光合产物的合成与运输, 为马铃薯产量和品质的形成奠定基础^[24,25]。乔建磊等^[26]系统研究了低钾胁迫下马铃薯植株光合机构响应特性, 结果表明低钾胁迫时马铃薯叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量都明显下降, 进而影响马铃薯光合速率。马铃薯块茎形成后, 充足的钾素供应条件下, 二分之一的光合产物在1 d内被转运到块茎中, 而钾素供应不足时, 只有不到一半的光合产物在同一时期被转移^[27]。钾主要通过影响马铃薯单株结薯数及大中薯率从而影响其产量, 合理提高土壤速效钾含量对提高马铃薯块茎产量效果显著^[28]。有研究表明, 适量增施钾肥可提高马铃薯结薯量、块茎质量、大薯率等指标, 从而增加马铃薯产量^[24,29,30]。研究表明, 在同一试验条件下, 氮肥的增产率可达64.7%、磷肥可达36.0%, 钾肥的马铃薯增产率仅为24.1%, 这说明限制马铃薯产量增加因子依次为氮>磷>钾^[31]。但是, 钾肥施用过多则会抑制作

物产量增加, 这可能是由于过量施钾肥会抑制作物对氮、镁、铁其他养分的吸收, 从而对植物生长产生不利影响^[32], 若此时作物对钾的吸收持续增加, 存在马铃薯对钾的奢侈吸收。因此, 合理施用钾肥对马铃薯产量和品质的提升至关重要。

马铃薯是喜肥作物, 其生育期内对氮、磷、钾元素形态和数量需求不尽相同, 需要根据种植区域土壤、气候条件及马铃薯品种差异选择合适的氮、磷、钾施肥量, 有利于实现资源最大化利用, 减少环境污染, 实现马铃薯的提质增效。

2 中微量元素对马铃薯生长发育的调控作用

中微量元素是植物生长发育必不可少的营养元素, 虽然作物对中微量元素的需求量较少, 但其在提高作物产量、提升作物抗逆性及改善作物品质等方面起到重要作用^[33]。长期以来由于人们只关注大量元素, 而忽视了中微量元素的投入, 造成土壤中微量元素缺乏, 限制了作物产量和品质的提高^[34]。研究表明, 马铃薯平均每生产1 000 kg块茎需吸收钙1.44 kg^[35]、镁3.56 kg^[36]、硫0.26 kg^[37]、硼5.80 g^[38]、锌5.30~12.90 g^[39]、铁78.20 g^[35]、锰7.40 g^[40]、铜3.83 g^[41]、钼0.51 g^[42]。

2.1 钙

钙在植株体内具有养分和信号的双重作用。缺钙会导致马铃薯生长发育过程中生理活动紊乱, 容易引起块茎褐斑病、空心病、软腐病等生理病害^[43], 表皮出现不光滑和易擦伤的现象, 严重影响马铃薯块茎产量及品质。钙与果胶酸形成果胶酸钙稳定细胞壁的结构, 施钙能增加薯皮厚度, 增强对真菌侵染的抵御能力, 从而减少病害的发生, 延长块茎的储存时间。当植物受到不良外界环境刺激时, 细胞内的钙信号转导会对环境胁迫作出应答反应。Ca²⁺和钙调蛋白(Calmodulin, CaM)作为信号分子对诱导马铃薯块茎产生具有一定作用, 钙信号可能参与调节匍匐茎尖激素水平从而诱导块茎形成, Ca²⁺通过钙依赖性蛋白激酶(Calcium-dependent protein kinases, CDPKs)诱导许多细胞内信号传导途径^[44]。然而, 马铃薯块茎被湿润的软土包围, 其蒸腾作用比地上部弱很多,

因此相比于叶片, 块茎更容易引起缺钙^[44]。有研究表明, 马铃薯对钙的吸收方式不同于其他营养元素, 通过主根系统吸收的钙元素直接被输送到地上部分, 而由匍匐茎和块茎产生的根从周围土壤中吸收钙为马铃薯块茎提供钙养分^[45]。施钙能提高马铃薯叶片光合色素含量, 提高光合速率, 为产量的形成奠定基础。合理施用钙肥不仅能提高马铃薯块茎产量和商品薯率, 而且可以显著促进碳水化合物和蛋白质的合成^[46], 提高块茎维生素C含量^[47], 提高马铃薯块茎抗机械擦伤能力^[48]以及降低块茎褐斑病、空心病等病害的发生率^[43]。然而, 土壤交换性钙含量并不能作为马铃薯生育期内钙需求量的唯一指标, 因为马铃薯对季节性钙养分需求较为敏感, 也就意味着每季马铃薯都需要增施一定的钙肥以达到增产、稳产的目的^[49]。综上, 钙对马铃薯的生长发育及产量形成十分重要, 在补充钙元素时必须考虑土壤、气候和其他肥料的均衡配施等问题, 通过控制钙肥的施用时期(块茎形成期和块茎膨大期)、施用方式(以水溶态钙的方式施用于块茎和匍匐茎周围)以及施用量来提高钙肥利用率。

2.2 镁

镁是马铃薯必需的营养元素, 参与植物体许多重要新陈代谢, 对马铃薯的生长发育、产量及品质形成具有重要作用。研究表明, 镁是叶绿素的中心原子, 是叶绿素中唯一的金属原子^[50], 对维持叶绿体结构举足轻重, 植物一旦缺镁叶绿体结构受到破坏, 基粒数下降、被膜损伤、类囊体数目降低^[51]。马铃薯植株轻度缺镁时, 表现为叶脉失绿; 严重缺镁时, 马铃薯根系和块茎生长受到抑制, 淀粉含量降低, 进而影响马铃薯产量和品质。刘林敏等^[52]研究表明, 不同镁肥处理马铃薯均增产10%以上。镁可以调控马铃薯淀粉的形成, 叶面喷施适宜浓度的硫酸镁, 能更好地促进马铃薯叶片同化产物的合成与运输, 也能增强马铃薯块茎对同化产物的接收与转运能力^[53], 有利于改善马铃薯块茎品质。

然而, 不能盲目的补充镁营养元素, 应根据目标区域土壤特征、镁肥性质合理补充镁肥, 以实现作物高产、高效。例如, 南方酸性土壤高降雨量地区, 施用水溶性含镁复合肥可能会造成大量的镁淋

洗或径流损失, 降低了镁肥的效果; 而施用难溶性镁肥, 其养分供应缓慢, 无法满足作物生育期内养分需求。因此, 应选择速缓效结合的镁肥, 既有利于减少镁淋洗损失, 又能保证作物镁素供应。

2.3 硫

硫素是马铃薯生长发育所必需的营养元素之一^[54], 参与植物重要新陈代谢过程, 对马铃薯体内蛋白质合成、中微量元素积累及马铃薯产量和品质形成具有重大意义。其对植物的影响仅次于氮、磷、钾。马铃薯缺硫后, 植物生长缓慢、叶片普遍黄化, 与缺氮表型类似, 然而叶片不会提前干枯凋落^[54]。施用硫肥可显著提高马铃薯块茎产量, 提高马铃薯块茎抗疮痂病能力, 促进马铃薯块茎品质提升, 例如提高马铃薯块茎维生素C含量^[55]。此外, 硫是含硫氨基酸的重要组成成分, 施用硫肥能提高作物中蛋白质含量, 改善品质^[56]。王惠珠^[57]在常规施肥的基础上增施硫肥, 可显著提高马铃薯块茎产量和品质, 实现增产、增收。综上, 合理施用硫肥可显著提高马铃薯产量和品质, 因此根据目标区域土壤及气候特征, 选择合适形态及合适施用量的硫肥, 对实现马铃薯高效高值生产、提升硫肥利用率具有重大意义。

2.4 微量元素

微量元素不仅是农业生产中作物产量和品质进一步提升的关键因素, 还是形成农产品独特风味的关键元素, 常常作为酶或酶辅助因子存在于植物体内, 具有较强的专一性和不可替代性^[58]。对马铃薯生长发育起调节作用的微量元素有很多, 其中对马铃薯生长、产量、品质提高具有调控作用的微量元素, 主要有锌、硼、锰、铁、铜、钼、氯。锌在植物光合作用、植物生长素和蛋白质合成中发挥关键作用^[59]。锌对马铃薯体内多种酶起调节、稳定和催化作用, 不仅是植物体内酶的重要组成成分, 而且作为酶辅助因子参与植物体内激素代谢、呼吸作用、光合作用等生理过程以及蛋白质、核酸等物质合成^[59]。马铃薯缺锌时表现为株型矮小、叶小畸形、叶脉间失绿黄化, 严重影响马铃薯产量和品质。硼能促进马铃薯碳水化合物的代谢和运输, 增强植物的光合作用, 防止叶片衰老, 促进根系发

育。贾景丽等^[60]研究表明,合理施用硼肥浸种能显著提升马铃薯块茎品质。适量施用锰肥可促进马铃薯出苗,增加马铃薯株高、减少块茎腐烂率,增强马铃薯抗逆性,促进马铃薯根系构建,其产量和品质均可得到改善^[61]。李凯等^[62]研究表明,叶面喷施铁锌锰肥可促进马铃薯植株生长发育,增加单株块茎重,提高马铃薯商品薯率,其产量也有明显的增加,并且通过增加马铃薯块茎中淀粉、维生素C等含量,提升马铃薯品质。铁可以参与马铃薯叶绿素的合成,促进马铃薯光合作用。马铃薯缺铁时叶片黄化,光合作用降低,且缺铁时会影响与呼吸作用有关离子的主动运输,影响多种代谢过程,例如降低还原糖、有机酸及维生素B₂的含量,进而影响马铃薯的生长发育过程。李丰先等^[63]研究表明,喷施铁、锌和铁锌配施,降低了马铃薯还原糖含量,提高了维生素C、淀粉、粗蛋白和干物质含量,改善了马铃薯的营养品质,且对马铃薯单株结薯数、单株产量和商品薯率均有积极影响,使马铃薯的营养价值和经济效益最大化。铜参与植物的光合作用,与叶绿素形成有关,铜可促进碳水化合物和蛋白质的代谢与合成,提高植物抗逆性。马铃薯叶面喷施铜能提高马铃薯叶片叶绿素含量,延长光合作用时间,生产更多光合产物,最终提高产量^[64]。植物对钼的需求量低于其他微量元素,其主要生理功能与氮的代谢有关。研究发现,适宜的钼和硼营养配施有效地抑制生物氧自由基对生物膜的破坏作用,维护生物膜的稳定与透性,促进细胞保护酶活性提高,降低其脂质过氧化作用,提高了植物的光合作用与正常的能量代谢,从而促进马铃薯的生长发育,提高产量^[65]。马铃薯在生长发育过程中对氯的需求也是必不可少的,一旦缺氯,马铃薯叶片出现退绿、叶尖枯萎等问题,进而影响植株的健康生长。但是在生长过程中也不应该过量施用氯元素,控制氯元素在土壤溶液中的浓度低于300 mg/kg,土壤溶液氯浓度过高时会抑制马铃薯对NO₃⁻的吸收,影响H₂PO₄⁻的吸收和运输,抑制光合产物向块茎积累^[66],进而影响马铃薯的正常生长发育。

综上,微量元素对马铃薯生长、产量和品质均有改善作用,然而微量元素的投入并不是越多越好,应根据马铃薯生育期内养分需求以及种植区域内土壤条件形成相应的施肥配方,有针对性地施用才能实现马铃薯的提质增效。目前,随着马铃薯主粮化战略的深入推进,马铃薯产量、耕作技术将会不断提高,这必然会导致土壤微量元素的消耗量增加,因此,补充马铃薯所需微量元素势在必行。

2.5 中微量元素的施用方式

中微量元素的施用方式对作物生长及产量形成也有较大的影响,例如,土壤中磷浓度过高或土壤偏碱性,土壤施用铁元素等则会影响其吸收和转运。如何补充中微量元素进而提高土壤养分有效性,满足马铃薯生育期内养分需求是马铃薯生产中需要注意的问题。中微量元素的合理补充需要因地制宜,根据土壤条件、气候条件以及马铃薯生育期内对养分需求特征,如果将中微量元素肥直接施入土壤,可能会造成中微量元素与大量元素拮抗,影响植物对中微量元素的吸收。就中微量元素施肥方式而言,主要有浸种、基施、拌种、土壤追施和叶面喷施,其中,叶面喷施因其简便易行、操作简单而被广泛应用。当然,中微量元素肥料的发展应向更便利、高效的方向进行,可以将马铃薯生育期内所需求的中微量元素与大量元素相结合制备富含中微量元素的复合肥,实现一次施肥,有助于降低施用成本,但这就要求采用中微量元素活化与保活、大量元素速效结合、各元素不同形态配伍等技术,实现营养元素在马铃薯生育期内长效供应。

3 展 望

各营养元素对马铃薯地上部生长、根系发育、产量和品质形成具有重要的调控作用,马铃薯生育期内合理的元素形态及元素供应量可实现马铃薯高效生产。目前,市面上马铃薯专用肥产品类型较多,但过度强调大量元素的重要性而忽略了中微量元素对马铃薯生长发育的影响,且肥料中各营养元素形态单一,不能匹配马铃薯生长

过程中对养分的动态需求。因此, 马铃薯复合肥产品创新应以马铃薯生育期内土壤条件、气候变化等为基础, 以马铃薯生育期内对各种养分的动态需求量、需求形态、元素之间相互协同相互拮抗等为科学依据, 以营养元素的形态配伍、速缓效结合、氮素适度缓释为创制手段, 以资源全量利用、低耗低排等绿色工艺为创制途径, 最终实现土壤-作物-肥料精准匹配的马铃薯新型复合肥产品, 从而真正实现马铃薯的绿色高值生产。

[参 考 文 献]

- [1] 鲁晓健, 董光美, 翟美英, 等. 不同施肥水平对冬作马铃薯产量的影响试验初报 [J]. 南方农业, 2019, 13(14): 85-86.
- [2] 罗其友, 高明杰, 张烁, 等. 中国马铃薯产业国际比较分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(7): 1-8.
- [3] 苏亚拉其其格, 樊明寿, 贾立国, 等. 氮素形态对马铃薯块茎形成的影响及机理 [J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 509-512.
- [4] 姜巍, 刘文志. 马铃薯测土配方施肥技术研究现状 [J]. 现代化农业, 2013(3): 11-13.
- [5] 李勇. 氮肥施用量对不同淀粉型马铃薯块茎淀粉积累及淀粉合成关键酶基因表达的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [6] Davis J M, Loescher W H, Hammond M W, *et al.* Response of potatoes to nitrogen form and to change in nitrogen form at tuber initiation [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1986, 111(1): 70-72.
- [7] 张美琴, 马建华, 樊明寿. 氮素形态与马铃薯品质的关系 [J]. 中国马铃薯, 2008, 22(6): 321-324.
- [8] 焦峰, 王鹏, 翟瑞常. 氮肥形态对马铃薯氮素积累与分配的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 39-44.
- [9] 苟久兰, 孙锐锋, 何佳芳, 等. 种植模式和氮肥形态对威芋3号马铃薯产量及品质的影响 [J]. 中国马铃薯, 2011, 25(1): 36-41.
- [10] 唐铭霞, 王克秀, 胡建军, 等. 不同氮素形态比对雾培马铃薯生长和原种产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 20-25.
- [11] 于静, 陈杨, 樊明寿. 马铃薯氮素营养特性及氮肥管理 [J]. 中国马铃薯, 2021, 35(2): 183-190.
- [12] 韩雪丰, 范茂攀, 刘润梅, 等. 云南省种植马铃薯农户氮磷钾养分投入及其土壤养分平衡状况分析 [J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2019, 34(3): 538-543.
- [13] 杨德桦. 不同施肥量和不同施肥方式对襄阳地区马铃薯产量、养分积累规律和品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [14] 廖佳丽, 徐福利, 赵世伟. 宁南山区施肥对马铃薯生长发育、产量及品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 48-52.
- [15] 赵映琴, 刘玉汇, 王丽, 等. 低磷胁迫下马铃薯试管苗生长及生理指标变化研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 183-187.
- [16] 王西瑶, 朱涛, 邹雪, 等. 缺磷胁迫增强了马铃薯植株的耐旱能力 [J]. 作物学报, 2009, 35(5): 875-883.
- [17] 李章田, 陈际才, 罗有卫. 不同磷肥施用量对冬马铃薯“合作88”生长及产量的影响 [J]. 云南农业科技, 2010(6): 6-8.
- [18] 杨丽辉, 蒙美莲, 陈有君, 等. 肥料配施对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(12): 136-140.
- [19] 程瑶, 孙磊, 原琳, 等. 磷肥用量对马铃薯淀粉理化性质及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1603-1613.
- [20] 孙常青, 杨艳君, 郭志利, 等. 施肥和密度对杂交谷可溶性糖、可溶性蛋白及硝酸还原酶的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1169-1177.
- [21] 谢奎忠, 杨桠, 张民, 等. 氮磷钾肥施用量对庄薯3号维生素C含量的影响 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(2): 192-196.
- [22] 程林润, 许砚杰, 周鑫, 等. 马铃薯栽培品种和地方品种矿质元素含量差异分析 [J]. 核农学报, 2018, 32(11): 2170-2177.
- [23] 张西露, 刘明月, 伍壮生, 等. 马铃薯对氮、磷、钾的吸收及分配规律研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2010, 24(4): 237-241.
- [24] 卢茗. 钾肥施用量对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 中国农业文摘-农业工程, 2022, 34(5): 44-47.
- [25] 康文钦, 石晓华, 敖孟奇, 等. 马铃薯的钾素需求及营养诊断 [J]. 中国土壤与肥料, 2013(2): 1-4.
- [26] 乔建磊, 于海业, 肖英奎, 等. 低钾胁迫下马铃薯植株光合机构响应特性 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(2): 569-573.
- [27] Haeder H, Mengel K, Forster H. The effect of potassium on translocation of photosynthates and yield pattern of potato plants [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 24(12): 1479-1487.
- [28] 侯叔音, 张春红, 邱慧珍, 等. 高钾肥力土壤增施钾肥对马铃薯的生物效应 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 172-176.
- [29] 王丽丽, 张胜, 蒙美莲, 等. 施钾对膜下滴灌马铃薯产量·品质及钾素利用效率的影响 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42(3): 731-734.
- [30] 赵永萍, 潘丽娟. 不同施钾量和施锌量对旱作马铃薯产量的影响 [J]. 西北农业学报, 2019, 28(9): 1492-1498.
- [31] 郭恒, 贾豪, 王舰. 氮磷钾肥配施对全膜覆盖马铃薯肥料利用率及产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 75-78.

- [32] Sardans J, Penuelas J. Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications [J]. *Plants (Basel)*, 2021, 10(2): 419.
- [33] 郝智勇. 中微量元素在马铃薯生产上的应用 [J]. *中国马铃薯*, 2017, 31(5): 307-311.
- [34] 吕慧峰, 王小晶, 陈怡, 等. 中微量元素肥料对马铃薯产量、品质和土壤肥力的影响 [J]. *陕西农业科学*, 2010, 56(5): 21-24.
- [35] 白艳妹. 马铃薯养分吸收分配规律及施肥对营养品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [36] 赵永秀, 蒙美莲, 郝文胜, 等. 马铃薯镁吸收规律的初步研究 [J]. *华北农学报*, 2010, 25(1): 190-193.
- [37] 冯琰, 蒙美莲, 尚国斌, 等. 马铃薯硫素吸收规律的初步研究 [J]. *中国马铃薯*, 2006, 20(2): 81-85.
- [38] 张胜, 白艳殊, 崔艳, 等. 马铃薯硼素吸收分配规律及施肥的影响 [J]. *华北农学报*, 2010, 25(1): 194-198.
- [39] 高炳德, 张胜, 白艳妹, 等. 不同营养条件下马铃薯锌素吸收分配规律的研究 [J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(4): 24-28.
- [40] 习敏, 杜祥备, 张胜, 等. 不同马铃薯品种锰素吸收分配规律的研究 [J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(2): 129-133.
- [41] 杜祥备, 习敏, 刘美英, 等. 不同马铃薯品种铜素的吸收、积累和分配 [J]. *中国马铃薯*, 2011, 25(3): 144-148.
- [42] 张胜, 白艳妹, 刘建平, 等. 施肥对马铃薯钼吸收分配的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1252-1257.
- [43] Ozgen S, Karlsson B H, Palta J P. Response of potatoes (cv russet burbank) to supplemental calcium applications under field conditions: tuber calcium, yield, and incidence of internal brown spot [J]. *American Journal of Potato Research*, 2006, 83(2): 195-204.
- [44] Nookaraju A, Shashank K U, Chandrama P H, *et al.* Role of Ca^{2+} -mediated signaling in potato tuberization: an overview [J]. *Botanical Studies*, 2012, 53(2): 177-189.
- [45] Palta J P. Improving potato tuber quality and production by targeted calcium nutrition: the discovery of tuber roots leading to a new concept in potato nutrition [J]. *Potato Research*, 2010, 53(4): 267-275.
- [46] 段咏新, 宋松泉, 傅家瑞. 钙对杂交水稻叶片中活性氧防御酶的影响 [J]. *生物学杂志*, 1999(1): 19-20.
- [47] 李冰, 王昌全, 冯长春, 等. 喷施不同钙肥对茼蒿产量及品质的影响 [J]. *中国农学通报*, 2004(2): 129-131.
- [48] Potarzycki J, Grzebisz W. The in-season variability in the calcium concentration in potato organs and its relationship with the tuber yield [J]. *Journal of Elementology*, 2020, 25(1): 107-124.
- [49] Gunter C C, Palta J P. Exchangeable soil calcium may not reliably predict in-season calcium requirements for enhancing potato tuber calcium concentration [J]. *American Journal of Potato Research*, 2008, 85(5): 324-331.
- [50] Jin B, Ge Q. Advances in research on plant chloroplast development [J]. *Botanical Research*, 2018, 7(6): 627-633.
- [51] 王芳, 刘鹏. 土壤镁的植物效应的研究进展 [J]. *江西林业科技*, 2003(1): 34-37.
- [52] 刘林敏, 徐火忠, 宁建美, 等. 镁对马铃薯产量和经济性状的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2005, 19(1): 28-29.
- [53] 王彦宏. 硫酸镁对马铃薯生长发育及淀粉合成积累作用效应的研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2010.
- [54] 刘坤, 贾立国, 秦永林, 等. 马铃薯硫素营养研究进展 [J]. *中国蔬菜*, 2021(8): 33-38.
- [55] 郇海龙. 硫对马铃薯产量和品质的影响及其生理基础研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [56] 张锡洲, 李廷轩. 对四川土壤硫素资源及施肥施用问题的浅析 [J]. *四川农业大学学报*, 2000(2): 183-185, 192.
- [57] 王惠珠. 马铃薯施硫效应研究 [J]. *农业科技通讯*, 2020(7): 155-160.
- [58] 孟赐福, 傅庆林, 丁晋林, 等. 微量元素对马铃薯产量和品质的影响 [J]. *中国马铃薯*, 1992, 6(2): 99-101.
- [59] 唐彩梅, 张小静, 袁安明, 等. 滴施 Ca、Zn 肥对马铃薯生长、产量及品质的影响 [J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(1): 19-25.
- [60] 贾景丽, 周芳, 赵娜, 等. 硼对马铃薯生长发育及产量品质的影响 [J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(5): 1081-1083.
- [61] 马光恕, 廉华, 林晓影, 等. 硫酸锰叶面喷施对马铃薯根系生长的影响 [J]. *吉林农业*, 2010(7): 44-45.
- [62] 李凯, 张国辉, 郭志乾, 等. 叶面喷施铁锌锰微肥对马铃薯生长、品质与产量的影响 [J]. *作物研究*, 2018, 32(1): 28-30, 34.
- [63] 李丰先, 罗磊, 李亚杰, 等. 铁锌配施对马铃薯植株性状和营养品质的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2022, 36(4): 314-321.
- [64] 姜丽霞, 张胜. 马铃薯微量营养元素特性研究进展 [J]. *现代农业*, 2017(4): 30-32.
- [65] 李军, 李祥东, 张殿军. 硼钼营养对马铃薯鲜薯产量及活性氧代谢的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2002, 16(1): 10-13.
- [66] 卢红霞. 氯(Cl^-)对马铃薯的某些生理效应及对土壤中氮肥行为的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.