

杜平, 赵竹青, 宋波涛, 等. 马铃薯锌营养特性及锌生物强化技术研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(4): 36-43.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.04.005

# 马铃薯锌营养特性及锌生物强化技术研究进展

杜平<sup>1,2</sup>, 赵竹青<sup>1,2</sup>, 宋波涛<sup>2</sup>, 刘新伟<sup>1,2</sup>

1. 华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070;

2. 农业农村部马铃薯生物学与生物技术重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 锌是植物和人体必需的微量元素, 锌缺乏是全球公共健康问题。在马铃薯主粮化背景下, 探讨马铃薯锌营养特性及锌生物强化技术手段对实现马铃薯富锌、改善人体缺锌状况具有重要意义。本文从马铃薯锌营养功能、马铃薯产区土壤锌状况、育种以及农艺强化技术等方面进行了综述和展望, 提出锌对马铃薯生长及产量和品质形成具有重要作用, 农艺强化是目前马铃薯锌营养强化主要技术措施, 育种强化需要进一步发掘利用优异种质资源, 旨在为科学利用锌生物强化技术实现马铃薯富锌提供一定的理论依据。

**关键词** 马铃薯; 锌缺乏; 富锌马铃薯; 锌生物强化技术; 马铃薯主粮化; 农艺强化; 育种强化

**中图分类号** S 512.11; S 572 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)04-0036-08

锌(Zn)是植物正常生长发育必需的微量元素之一, 参与植物光合作用、蛋白质合成、生长素合成以及细胞分裂等生理过程, 并对维持生物膜稳定性具有重要作用<sup>[1]</sup>。同时, 锌是人体必需微量元素, 与人体健康密不可分, 其含量仅次于铁, 居第2位<sup>[2]</sup>。人体缺锌会导致皮肤炎、生长迟缓、免疫系统缺陷、生殖障碍等多种疾病<sup>[3]</sup>。据调查, 全世界约有20亿人口面临缺锌引起的健康问题, 在发展中国家尤为严重<sup>[4]</sup>。食用天然富锌的植物性食品是解决人体缺锌的根本途径, 并日益受到大众的重视。在农业生产领域, 农艺强化技术和育种强化技术是提高作物锌含量的2种重要技术措施<sup>[5]</sup>。马铃薯作为世界第四大粮食作物<sup>[6]</sup>, 利用锌生物强化技术提高其块茎锌含量对改善人体锌营养健康具有重要意义。本文综述了锌在马铃薯中的营养功能、分布规律, 锌与马铃薯产量和品质的关系, 马铃薯主产区土壤锌状况以及国内外马铃薯锌生物强化技术研究进展, 最后对马铃薯锌营养强化研究作了展望, 旨在为科学利用锌生物强化技术实现马铃薯富锌提供一定的理论依据。

## 1 马铃薯锌营养特性

### 1.1 锌在马铃薯中的生理功能

锌对马铃薯营养物质合成代谢及植株生长发育

有重要作用。锌是植物体内多种酶类的金属组分和活化因子, 例如超氧化物歧化酶(SOD)、乙醇脱氢酶(ADH)、碳酸酐酶(CA)、RNA聚合酶等重要的酶中都含有结合态锌<sup>[7]</sup>。研究表明, 外源施锌可提高马铃薯CA活性, 促进CO<sub>2</sub>水合反应, 增强光合作用<sup>[8]</sup>。锌参与马铃薯激素合成与代谢, 其中, 生长素(IAA)对促进匍匐茎发育和伸长具有重要作用, 锌通过激活色氨酸合成酶催化吲哚和丝氨酸合成色氨酸, 缺锌使色氨酸合成酶活性下降, IAA的前体物质色氨酸含量下降, 导致生长素合成锐减, 进而影响匍匐茎发育<sup>[9-10]</sup>。锌是叶绿体的组成成分之一, 并通过影响光合作用和糖的转化参与碳水化合物代谢, 外源施锌使马铃薯叶绿素含量明显增加、光合速率显著上升<sup>[11]</sup>。锌还与蛋白质合成密切相关, 马铃薯叶面喷施硫酸锌和糖醇锌后, 块茎可溶性蛋白质含量较不施锌增加了13.8%和22.3%<sup>[12]</sup>。锌对提高马铃薯抗逆性也有重要作用, 有研究发现<sup>[13]</sup>, 适量施锌可明显提高马铃薯超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性, 进而减少或消除过量活性氧(ROS)对细胞造成的伤害, 还有研究发现锌与过氧化氢酶(CAT)活性也存在关联, 马铃薯缺锌时, 植株体内CAT表达明显下调<sup>[14-15]</sup>, 表明锌在马铃薯抗氧化酶防御系统中具有重要作用。此外, 施锌

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD020080104)

杜平, E-mail: 18468182226@163.com

通信作者: 刘新伟, E-mail: lxw2016@mail.hzau.edu.cn

还可提高马铃薯的抗逆能力,例如施锌使马铃薯根冠比增加,光合作用增强,植株水分利用率提高,进而增强其抗旱能力<sup>[16]</sup>。

## 1.2 马铃薯锌吸收分配规律

马铃薯是一种对锌中度敏感的作物,其体内锌浓度变化是遗传因素和外界环境条件共同作用的结果,土壤有效锌含量是导致块茎锌浓度差异的主要原因<sup>[17-18]</sup>。一般认为马铃薯叶片干基含量低于27 mg/kg时有可能出现缺锌症状,超过150 mg/kg时则可能对植株产生毒害<sup>[19]</sup>。但有研究发现,马铃薯叶面喷施硫酸锌后,其叶片锌干基含量达到甚至超过368 mg/kg时,植株并未表现出明显的中毒症状,对此,研究人员指出过量的锌存储于质外体中而非细胞内部可能是马铃薯避免锌毒害的一种生理机制<sup>[20]</sup>。由于马铃薯的养分贮藏库——块茎位于地下,植株对锌的吸收分配特点与水稻、小麦等作物存在明显不同。研究表明,发育中的马铃薯块茎可直接通过木质部途径获取水分和部分金属离子,但块茎中的锌主要依赖于地上部器官通过韧皮部运输途径进行重新分配<sup>[21-22]</sup>。不同品种马铃薯锌吸收累积量差异较大,但不施锌时,其不同器官锌含量一般以茎最高,叶和根次之,块茎最低,各器官锌含量随生育期推进总体呈下降趋势,块茎膨大期是马铃薯锌吸收和积累的高峰期,块茎锌积累量自块茎形成后持续升高,成熟期块茎锌分配率可达50%以上;增施锌肥可显著提高马铃薯叶、茎、根及块茎中的锌含量,但块茎锌含量增幅远远小于其他器官增幅<sup>[23-25]</sup>,因此,如何利用不同技术增加锌向马铃薯块茎的分配率,提高块茎锌含量,还有待进一步研究。

## 1.3 锌对马铃薯产量和品质的影响

锌对马铃薯产量与品质形成也有重要作用。充足的锌供应可提高马铃薯种薯发芽率,提高叶面积指数,增强光合作用,增加块茎发育数量和促进干物质积累,进而增加块茎产量,增施锌肥时,马铃薯产量增幅在7%~25%<sup>[26-28]</sup>,变异幅度较大,这与锌肥类型、土壤条件和品种等因素密切相关。块茎锌含量则与产量呈负相关关系,这可能是由于产量增加引起了稀释效应,导致锌含量下降<sup>[24]</sup>。施用高剂量锌肥时,马铃薯块茎锌含量显著增加,但往往也容易导致减产<sup>[26]</sup>。有研究指出,当施锌量超过40 kg/hm<sup>2</sup>时,可能会引起马铃薯锌中毒,造成茎叶组织受损、冠层发育不良及匍匐茎发育数量减少等不良现象,进而导致减产<sup>[29]</sup>。就品质而言,

锌对马铃薯块茎品质形成具有重要作用。大量研究证实,施锌可增加马铃薯块茎中淀粉、可溶性固形物、总糖、游离氨基酸、抗坏血酸、蛋白质等物质的含量,有效改善马铃薯品质并延长其货架寿命;同时可降低块茎中还原糖和酚类化合物的含量<sup>[30-31]</sup>,这对提升马铃薯产品观感及鲜食风味均有积极作用。因此,在土壤缺锌地区,可通过增施锌肥提高马铃薯产量并改善其营养品质,但应注意研究和制定科学合理的施肥方案,避免盲目施肥造成资源浪费,增加生产成本,在实现马铃薯增产提质的同时兼顾良好的经济效益。

## 2 马铃薯种植区域土壤锌状况

目前,世界范围内土壤缺锌现象十分普遍。全球缺锌土壤面积约为30%,甚至可能高达50%,中国缺锌土壤约为40%,约50%的土壤有效锌(DT-PA-Zn)含量低于1 mg/kg<sup>[32]</sup>。土壤缺锌地区往往也是人体缺锌较为普遍的地区。当前,马铃薯是继水稻、小麦、玉米之后的世界第四大粮食作物,其锌含量高低对人类健康有着深远影响。联合国粮食及农业组织(FAO)统计数据(<http://faostat.fao.org/>)显示,亚洲和欧洲是目前世界马铃薯的两大生产中心。截至2019年,亚洲马铃薯产量在世界总产量中的占比为42.8%,欧洲产量占比为38.1%。这两大产区均与世界土壤缺锌区域存在重叠,尤其是亚洲土壤缺锌更为普遍。根据现有研究结果及报道,世界马铃薯平均锌含量仅有15 mg/kg左右,这与土壤有效锌含量低存在重要关联,在严重缺锌地区,马铃薯锌含量甚至不足10 mg/kg<sup>[26,33]</sup>,远远低于粮食作物推荐锌含量(40~60 mg/kg)。我国是世界马铃薯生产和消费第一大国,马铃薯种植区域分为北方一作区、中原二作区、西南单双季混作区和南方二作区四大区域<sup>[34]</sup>。其中,北方一作区和西南单双季混作区是我国马铃薯的主要产区,种植面积占比分别为53.8%和36.5%,产量占比分别为49.1%和39.8%<sup>[35]</sup>。北方一作区包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等省(自治区),与我国缺锌地带高度重叠,尤其是西北地区受干旱缺水、土壤pH值及碳酸钙含量高等因素影响,土壤缺锌问题更为严重,是我国缺锌面积最大的区域,其中部分区域土壤有效锌平均含量仅有0.39 mg/kg左右<sup>[36]</sup>。李建武等<sup>[37]</sup>研究了甘肃省陇薯系列马铃薯锌含量,发现其块茎平均锌含量仅有12.9 mg/kg(干基)左右,这与

土壤有效锌含量低关系密切。西南单双季混作区主要包括西藏、贵州、四川、云南和重庆等地,土壤有效锌含量总体高于北方一作区,且高于缺锌临界值(0.5 mg/kg),但西南地区地形复杂,海拔、气候、成土母质类型等差异较大,土壤锌分布不均,部分地区例如黑色石灰土区域和红色石灰土区域有效锌含量在临界值以下<sup>[38]</sup>。

总之,我国马铃薯主产区土壤缺锌或有效锌含量偏低现象较为普遍,但目前各产区内土壤有效锌状况多局限于单点、小范围内调查研究,缺乏系统全面的数据;同时农业种植制度调整、农田利用率提高和长期高水肥投入等因素是否对土壤锌有效性产生影响,还有待调查明确。

### 3 马铃薯锌生物强化技术

#### 3.1 农艺强化技术

农艺强化操作简单、见效快,在当前作物锌营养强化领域应用广泛,增施锌肥是其主要举措。大量研究证明<sup>[39-40]</sup>,施用锌肥可快速提高作物根、茎、叶、果实、种子及块茎等器官中的锌含量,这对短期内缓解作物及人体缺锌具有重要意义。对马铃薯而言,其块茎富含抗坏血酸和氨基酸等物质,而植酸、多酚等抗营养物质含量很低,对块茎锌积累和人体吸收利用锌都较为有利,因此其在锌营养强化方面具有较大潜力<sup>[41]</sup>。

1) 锌肥种类对马铃薯锌营养强化的效果。作物施锌效果与锌肥种类密切相关。锌肥分为无机锌肥和有机锌肥2种。无机锌肥包括硫酸锌、氯化锌、氧化锌、硝酸锌等<sup>[18]</sup>。有机锌肥是指锌元素与有机配体形成的络合物或螯合物,如Zn-EDTA、氨基酸锌复合物<sup>[42]</sup>、螯合态糖醇锌<sup>[43]</sup>等。马铃薯对不同类型锌肥的吸收规律不同,不同类型锌肥对块茎锌含量的贡献率也不同<sup>[24,43]</sup>。以硫酸锌、氧化锌和硝酸锌3种无机锌肥作为锌源时,马铃薯对氧化锌的响应最好,块茎锌含量达到了20 mg/kg(干基),比未施锌肥处理增加了40%<sup>[26]</sup>。施用相同浓度的硫酸锌(无机锌肥)和糖醇锌(有机锌肥)时,马铃薯各器官的锌浓度和锌累积量均显著提高,植株锌吸收速率也显著上升,但糖醇锌施肥效果明显优于硫酸锌。其中,糖醇锌处理植株最大锌吸收速率比不施锌肥增加了约2倍,块茎锌素累积量比不施锌肥增加了49.4%,比施硫酸锌增加了8.7%<sup>[43]</sup>。表明选择合适的锌源对实现马铃薯锌营养强化至关重要。此

外,鉴于传统农业生产模式施肥量大、肥料利用率低、面源污染严重等问题突出,各类含锌复合肥、缓释肥、专用肥等逐渐出现并成为锌肥发展趋势。有研究报道了一种含锌微量元素缓释肥(Zn:Fe:Mn:Cu:Mg:P=3:1:0.5:0.25:0.125:8)在马铃薯上的施用效果优于硫酸锌,该缓释肥在3种不同用量水平下马铃薯产量及块茎锌产量分别比单施硫酸锌增加了17.3%~31.5%和65.7%~80.8%<sup>[44]</sup>;另有一项发明专利《小麦、马铃薯富硒、富锌专用种肥》<sup>[45]</sup>表明施用该种肥料可以使马铃薯块茎富锌又富硒,并促进马铃薯增产提质。未来,有必要进一步研发新型马铃薯专用锌肥,以进一步提高马铃薯锌含量并增加其营养附加值。

2) 施锌方式对马铃薯锌营养强化的效果。施肥方式对马铃薯锌含量也有显著影响。施锌方式包括拌种、土施(基施)和叶面喷施。马铃薯采用锌肥拌种+叶面喷施的施肥方式时,块茎锌含量随着喷锌浓度的提高而逐渐升高,锌肥拌种增加了马铃薯块茎中的锌含量,收获后马铃薯块茎锌含量及锌累积量分别比仅喷施锌肥处理增加7.7%~19.1%和10.9%~24.7%<sup>[46]</sup>。采用单一的土壤施锌或叶面施锌方式均能明显提高马铃薯根、茎、叶及块茎中的锌含量,但叶面施锌更有利于锌向块茎转移,增加块茎锌含量。Kromann等<sup>[24]</sup>对马铃薯分别进行了土壤施锌、叶面施锌和土施+叶面施锌处理,结果表明3种不同施锌方式处理的块茎锌含量比不施锌处理分别提高1.9倍、2.5倍和2.7倍。其中,土壤施锌肥条件下,马铃薯根系锌浓度比茎叶锌浓度提高1.6~2.7倍,比块茎提高17.8~37.7倍,表明植株从土壤中吸收锌时,锌易滞留在马铃薯根部,难以大量运输至地上部并进一步有效分配至块茎中。而采用叶面施锌时,茎叶锌浓度比根系锌浓度提高1.2~1.6倍,比块茎提高6.3~7.7倍,表明通过叶片吸收的锌向块茎转运的效率相对较高,这可能与锌的运输距离缩短有关。此外,在不同施锌方式下,锌元素与大量元素配合施用可促进马铃薯对锌的吸收利用。例如锌肥与尿素配合喷施时,尿素可通过影响叶片氮代谢而促进锌向块茎的转运,使块茎锌含量进一步提高,比单施锌肥增加0.3%~14.5%,增幅因品种而异<sup>[26]</sup>。锌肥与钾肥配合进行土施时,马铃薯锌含量明显高于单施锌肥处理,植株锌累积量增加了15.3%,且锌在块茎中的分配率由48%提高至51%,表明锌和钾之间可能存在协同作用<sup>[47]</sup>。因

此,锌肥与大量元素合理配施可能是进一步提高马铃薯锌含量的有效途径,但其作用机制还有待于进一步研究明确。需要注意的是,马铃薯虽然对锌具有一定的富集能力,但锌富集能力很低,即使采取肥料利用率较高的叶面施锌方式,锌从地上部向块茎的转运量仍十分有限,块茎锌含量距离满足人体正常需求的锌含量水平尚有较大差距,锌在韧皮部中移动性差可能是限制块茎锌含量增加的重要原因<sup>[20,26]</sup>。另外还需注意,叶面施锌一般作为追肥施用,喷施0.02%~0.2%硫酸锌,在块茎形成期至块茎膨大期需连续喷施2~3次。土施锌肥存在后效,具体用量应根据土壤锌含量而定,一般在土壤有效锌含量低于临界值(DTPA-Zn<0.5 mg/kg)时才需要补充锌肥。一次性土壤施用锌肥20~40 kg/hm<sup>2</sup>,当季收获后土壤中残留的锌可满足后续4 a及以上轮作期内马铃薯正常生长对锌的需求,因此应避免连续施用导致作物锌中毒<sup>[24]</sup>。

3) 马铃薯富锌栽培技术与应用。在生产实践中,栽培措施也是影响马铃薯锌含量的重要因素。在富锌栽培技术研究方面,有研究表明,施用畜禽粪便等有机肥可明显提高土壤全锌和有效锌含量<sup>[48]</sup>,其原因在于有机肥不仅自身富含微量元素,同时可以降低土壤酸碱度、增加土壤微量元素的溶解性<sup>[49]</sup>;在全膜垄作侧播模式下,不同品种旱作马铃薯锌含量表现出明显差异,块茎锌含量变化为15.50~28.96 mg/kg,变异系数为19.45%<sup>[50]</sup>;黑膜覆盖下“一基免追”施肥模式中,施用普通复合肥和缓释复合肥均显著提高了马铃薯锌含量<sup>[51]</sup>。因此,合理选择栽培品种并结合有机肥与化肥配施、地膜覆盖、施用复合肥、缓释肥等科学栽培措施,可作为提高马铃薯锌含量的有效举措。在富锌栽培技术推广应用方面,甘肃省作为中国马铃薯种植生产的重要省份之一,于2013年率先启动了马铃薯铁锌生物强化项目,并于2016年制订了《旱作区无公害富锌马铃薯栽培技术规程》,2017年1月正式实施<sup>[52]</sup>。云南省农业科学院培育出的富锌马铃薯新品种‘云薯304’也有其明确的栽培技术要点<sup>[53]</sup>。综合来看,实现马铃薯富锌不仅需要生产中合理运筹锌肥,还需要辅以科学的栽培措施。因地制宜制定富锌栽培技术是实现富锌马铃薯规模化种植生产的重要前提。

### 3.2 育种强化技术

育种强化技术在缓解作物及人体缺锌方面性价

比高、可持续性强,是目前作物锌营养强化领域的研究热点。对马铃薯而言,其种质资源的锌含量遗传变异范围在2~37 mg/kg,锌含量广义遗传力估值在0.19~0.82<sup>[54-56]</sup>,变异范围均较大,因此采用遗传育种强化技术提高块茎锌含量具有可行性。传统育种强化的障碍在于当前生产用栽培品种多为同源四倍体,遗传背景相对狭窄,基因库贫乏,育种后代变异停留在近交水平,严重制约优良品种的选育。但自然界中的马铃薯种质资源丰富,其中二倍体占比达到74.4%,包括绝大多数的原始栽培种和野生种,其具有抗病、抗虫和抗逆等优良性状,可作为品种改良的重要种质资源,通过4x×2x杂交方式可将二倍体种中的目标性状转移到四倍体种中<sup>[57-58]</sup>。在国际作物营养强化(Harvest Plus)项目中,研究人员利用富锌、富铁二倍体马铃薯与抗病无性系四倍体马铃薯进行杂交,培育出了既富锌又富铁的马铃薯栽培品种;在秘鲁,研究人员同样采用杂交育种方式培育出了一个富锌马铃薯品种‘INIA-321-Kaw-say’<sup>[59]</sup>,但在栽培种植过程中,马铃薯块茎锌含量受到显著的基因型与环境互作效应影响<sup>[17,60]</sup>,因此富锌新品种需要在不同环境条件下对其遗传稳定性进行测评<sup>[56]</sup>,以保证其对环境的适应性及稳定性。除了传统育种强化技术,现代分子标记及转基因育种等技术也已应用于作物锌营养强化领域,例如国际马铃薯中心(CIP)利用转基因技术成功培育出了50多个高锌马铃薯无性系品种,其锌含量均超过35 mg/kg<sup>[24]</sup>,大幅超过常规栽培品种锌含量。但作物育种周期长、效率低,有学者曾指出利用传统育种技术改良马铃薯品种需要耗费10~15 a<sup>[61]</sup>。利用转基因技术可大大缩短育种周期,提高新品种遗传稳定性,目前利用该技术实现作物微量营养素强化已具备可行性,但其实际应用还面临着社会经济、人体健康、伦理道德等方面的挑战。

## 4 问题与展望

缺锌是人类面临的全球性重要健康问题,为此,国际Harvest Plus项目已将马铃薯列为锌营养强化的目标作物之一,旨在通过增加马铃薯锌含量为改善人体锌营养状况做出贡献。

目前,农艺强化是马铃薯锌营养强化的主要技术措施,其在有效提高马铃薯块茎锌含量的同时对促进马铃薯增产提质也有重要作用。但存在以下几个问题亟待解决:

首先,增施锌肥条件下,块茎锌含量增幅远低于其他营养器官,如何采用不同技术提高块茎锌分配率,实现块茎富锌还有较大发展空间。其次,农业种植制度改变、长期高水肥投入及高产携出等因素对土壤锌有效性产生了复杂的影响,现阶段马铃薯主产区土壤有效锌含量状况有待调查明确,进而为锌肥推广应用提供依据。再者,目前富锌马铃薯生产多处于研究或试点阶段,符合各地生产实际的标准化和规范化富锌栽培技术有待研究制定并推广实施。最后,施用锌肥时,需要对土壤、作物、产品、环境建立全方位监测和评估体系,以在确保实现良好富锌效果的同时避免潜在的环境污染风险。

长远来看,育种强化具有高性价比和可持续性,但目前其功效性、稳定性及安全性还有待考量。此外,该技术的难点在于马铃薯锌遗传机制研究和富锌种质资源筛选方面,现阶段世界范围内已筛选出多个含锌量相对较高的马铃薯栽培品种,但富锌专用品种仍极度匮乏,因此,需要进一步发掘和利用马铃薯优异种质资源,明确块茎锌含量遗传机制,加强富锌专用品种选育工作,为富锌马铃薯生产奠定基础。

## 参考文献 References

- [1] BROADLEY M R, WHITE P J, HAMMOND J P, et al. Zinc in plants[J]. *New phytologist*, 2007, 173(40): 677-702.
- [2] CHASAPIS C T, LOUTSIDOU A C, SPILIOPOULOU C A, et al. Zinc and human health: an update[J]. *Archives of toxicology*, 2012, 86(4): 521-534.
- [3] JUROWSKI K, SZEWCZYK B, NOWAK G, et al. Biological consequences of zinc deficiency in the pathomechanisms of selected diseases[J]. *Journal of biological inorganic chemistry*, 2014, 19(7): 1069-1079.
- [4] CAKMAK I, KALAYCI M, KAYA Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2010, 58(16): 9092-9102.
- [5] BOUIS H E, HOTZ C, MCCLAFFERTY B, et al. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition[J]. *Food and nutrition bulletin*, 2011, 32(S): 31-40.
- [6] SINGH J, KAUR L, MOUGHAN P J. Importance of chemistry, technology and nutrition in potato processing[J/OL]. *Food chemistry*, 2012, 133(4): 1091 [2021-04-21]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.128>.
- [7] 胡明芳,文启凯,田长彦.作物锌素营养研究进展与展望[J]. *新疆农业科学*, 1997, 34(5): 214-216. HU M F, WEN Q K, TIAN C Y. Research progress and prospect of zinc in nutrition in crops[J]. *Xinjiang agricultural sciences*, 1997, 34(5): 214-216 (in Chinese).
- [8] PUZINA T I. Effect of zinc sulfate and boric acid on the hormonal status of potato plants in relation to tuberization[J]. *Russian journal of plant physiology*, 2004, 51(2): 209-215.
- [9] 刘丹,徐梦薇,胡月清,等.马铃薯块茎发育期主要植物激素的动态变化[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(6): 1998-2003. LIU D, XU M W, HU Y Q, et al. Dynamic changes of key plant hormones during potato tuber development[J]. *Molecular plant breeding*, 2019, 17(6): 1998-2003 (in Chinese with English abstract).
- [10] ROUMELIOTIS E, KLOOSTERMAN B, OORTWIJN M, et al. The effects of auxin and strigolactones on tuber initiation and stolon architecture in potato[J]. *Journal of experimental botany*, 2012, 63(12): 4539-4547.
- [11] 马光恕,廉华,冯云霞,等.叶面喷施硫酸锌对马铃薯淀粉合成和积累的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(4): 46-52. MA G S, LIAN H, FENG Y X, et al. The effect of zinc sulfate by leaf spraying on potato starch synthesis and accumulation[J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2010(4): 46-52 (in Chinese with English abstract).
- [12] 孙小龙.不同锌肥及锌、铁配施对旱作马铃薯产量和营养品质及其形成规律的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2014. SUN X L. Effects of different zinc fertilizers and zinc iron assort under rainfed farming conditions potato yield and nutritional quality formation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [13] 杜玮. 纳米氧化锌(ZnO NPs)对马铃薯的生长发育、锌吸收及土壤微生物的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020. DU W. Effects of application ZnO NPs on potato growth, zinc absorption and soil microorganisms [D]. Yangling: North West A&F Forestry University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨丽丽.铁、锰、锌缺乏下马铃薯试管苗差异蛋白质组分析[D].兰州:甘肃农业大学,2017. YANG L L. Comparative proteomic analysis of potato seedling *in vitro* under iron, manganese, or zinc deficiency[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [15] RAIGOND P, RAIGOND B, KAUNDAL B, et al. Effect of zinc nanoparticles on antioxidative system of potato plants[J]. *Journal of environmental biology*, 2017, 38(3): 435-439.
- [16] 赵兴杰,韩旭平,程升.干旱条件下膜下滴灌施锌对马铃薯的促进效应[J]. *山西农业科学*, 2017, 45(1): 63-66. ZHAO X J, HAN X P, CHENG S. Effect of zinc fertilization on potato under drip irrigation under drought condition [J]. *Journal of Shanxi agricultural sciences*, 2017, 45(1): 63-66 (in Chinese with English abstract).
- [17] BURGOS G, AMOROS W, MOROTE M, et al. Iron and zinc concentration of native Andean potato cultivars from a human nutrition perspective[J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2007, 87(4): 668-675.
- [18] WHITE P J, BROADLEY M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets: iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. *New*

- phytologist, 2009, 182(1): 49-84.
- [19] WALWORTH J L, MUNIZ J E. A compendium of tissue nutrient concentrations for field-grown potatoes[J]. American potato journal, 1993, 70(8): 579-597.
- [20] WHITE P J, BROADLEY, HAMMOND J P, et al. Bio-fortification of potato tubers using foliar zinc-fertiliser[J]. The journal of horticultural science and biotechnology, 2012, 87(2): 123-129.
- [21] BAKER D A, MOORBY J. The transport of sugar, water, and ions into developing potato tubers[J]. Annals of botany, 1969, 33(4): 729-741.
- [22] 孙红, 郑涛, 刘宁, 等. 高光谱图像检测马铃薯植株叶绿素含量垂直分布[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 149-156. SUN H, ZHENG T, LIU N, et al. Vertical distribution of chlorophyll in potato plants based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(1): 149-156 (in Chinese with English abstract).
- [23] 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, 2010, 31(4): 24-28. GAO B D, ZHANG S, BAI Y S, et al. Dynamic of zinc uptake in potato plants in different conditions[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2010, 31(4): 24-28 (in Chinese with English abstract).
- [24] KROMANN P, VALVERDE F, ALVARADO S, et al. Can Andean potatoes be agronomically biofortified with iron and zinc fertilizers? [J]. Plant and soil, 2017, 411(1/2): 121-138.
- [25] 习敏. 马铃薯不同品种锰锌吸收、积累、分配规律及施肥响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011. XI M. Studies on the uptake, accumulation and distribution of manganese, zinc and fertilization effects in different potato cultivars[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [26] WHITE P J, THOMPSON J A, WRIGHT G, et al. Biofortifying Scottish potatoes with zinc[J]. Plant and soil, 2017, 411(1/2): 151-165.
- [27] 罗磊, 李亚杰, 黄凯, 等. 不同增施微肥方式对马铃薯块茎产量和 Zn、Fe 含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 152-156, 206. LUO L, LI Y J, HUANG K, et al. Influences of different application methods of micronutrient fertilizers to yield and content of zinc and iron in potato[J]. Agricultural research in the arid areas, 2017, 35(2): 152-156, 206 (in Chinese with English abstract).
- [28] MURMU S, SAHA S, SAHA B, et al. Influence of Zn and B on the yield and nutrition of two widely grown potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Annals of biology, 2014, 30(1): 37-41.
- [29] MONDY N I, CHANDRA S. Effect of zinc fertilization on yield, enzymatic discoloration, phenolic and nitrogenous constituents of potato tubers[J]. Journal of food science, 1981, 46(6): 1878-1880.
- [30] BANERJEE H, SARKAR S, DEB P, et al. Zinc fertilization in potato: a physiological and bio-chemical study[J]. International journal of plant & soil science, 2017, 16(2): 1-13.
- [31] 马振勇, 杜虎林, 刘荣国, 等. 施锌肥对旱作马铃薯植株锌含量及块茎品质的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 201-207. MA Z Y, DU H L, LIU R G, et al. Effects of zinc fertilizers on zinc content of potato plants and tuber quality under rainfed conditions[J]. Acta agriculturae boreali-sinica, 2017, 32(1): 201-207 (in Chinese with English abstract).
- [32] YANG X E, CHEN W R, FENG Y. Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil-plant system: China as a case study[J]. Environmental geochemistry and health, 2007, 29(5): 413-428.
- [33] ÖZTÜRK E, ATSAN E, POLAT T, et al. Variation in heavy metal concentrations of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars [J]. Journal of animal and plant sciences, 2011, 21(2): 235-239.
- [34] 谢从华. 马铃薯产业的现状与发展[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2012(1): 1-4. XIE C H. Potato industry: status and development [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2012(1): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 中国马铃薯主产区生产特点、限制因子和对策分析[J]. 中国马铃薯, 2020, 34(6): 374-382. LI Y, WANG J, TANG J Z, et al. Analysis of production characteristics, restrictive factors, and strategies for main potato production areas in China [J]. Chinese potato journal, 2020, 34(6): 374-382 (in Chinese with English abstract).
- [36] 李芳亭, 鲁强, 王世国, 等. 黄土丘陵区土壤镉锌含量及农作物对镉锌的反应[J]. 农业环境科学学报, 2002, 21(6): 559-561. LI F T, LU Q, WANG S G, et al. Concentration of molybdenum and zinc in soil of upland of loess and response of crops [J]. Journal of agro-environmental science, 2002, 21(6): 559-561 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李建武, 文国宏, 李高峰, 等. 陇薯系列高淀粉马铃薯品种的淀粉产量及品质性状综合评价[J]. 核农学报, 2020, 34(2): 329-338. LI J W, WEN G H, LI G F, et al. Evaluation of starch yield and nutrition quality traits in longshu series potato varieties with high starch content [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2020, 34(2): 329-338 (in Chinese with English abstract).
- [38] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37. LIU Z. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China [J]. Scientia agricultura sinica, 1994, 27(1): 30-37 (in Chinese with English abstract).
- [39] ÇAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? [J]. Plant and soil, 2008, 302(1/2): 1-17.
- [40] BOUIS H E, WELCH R M. Biofortification: a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the Global South [J]. Crop science, 2010, 50(S1): 20-32.
- [41] VERGARA-CARMONA V M, CECÍLIO FILHO A B, ALMEIDA H J D, et al. Fortification and bioavailability of zinc in potato [J]. Journal of the science of food and agriculture,

- 2019,99(7):3525-3529.
- [42] 王晨,刘朝,马婧,等.叶面喷施氨基酸锌复合物对水稻产量性状和锌吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2017(4):118-123. WANG C,LIU Z,MA J, et al.Effects of foliar applications of zinc-amino acid complexes on yield characters and zinc uptake of rice[J].Soil and fertilizer sciences in China,2017(4):118-123(in Chinese with English abstract).
- [43] 孙小龙,王延明,张春红,等.不同锌肥对旱作马铃薯植株锌的吸收、积累与分配的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):72-78.SUN X L,WANG Y M,ZHANG C H, et al.Effects of different kinds of zinc fertilizers on zinc absorption,accumulation and distribution of potato under rainfed conditions[J].Agricultural research in the arid areas,2015,33(3):72-78(in Chinese with English abstract).
- [44] BANDYOPADHYAY S,GHOSH K,VARADACHARI C.Multimicronutrient slow-release fertilizer of zinc,iron,manganese,and copper[J/OL].International journal of chemical engineering,2014,2014:1-7 [2021-04-21]. <https://doi.org/10.1155/2014/327153>.
- [45] 高炳德,张胜.小麦、马铃薯富硒、富锌专用种肥:CN102219586A[P].2011-10-19.GAO B D,ZHANG S.Selenium-enriched and zinc-enriched seed manure special for wheat and potato:CN102219586A[P].2011-10-19(in Chinese).
- [46] 王延明.锌肥用量及施用方法对马铃薯产量形成及营养品质的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2014.WANG Y M.Effects of zinc fertilizer rates and application methods on potato tuber yield formation and nutritional quality[D].Lanzhou:Gansu Agricultural University,2014(in Chinese with English abstract).
- [47] TIWARI K N,NIGAM V,PATHAK A N.Effect of potassium and zinc applications on dry-matter production and nutrient uptake by potato variety 'Kufri chandramukhi' (*Solanum tuberosum* L.) in an alluvial soil of Uttar Pradesh[J].Plant and soil,1982,65(1):141-147.
- [48] 茹淑华,张国印,苏德纯,等.禽粪有机肥对土壤锌积累特征及其生物有效性的影响[J].华北农学报,2011,26(2):186-191. RU S H,ZHANG G Y,SU D C, et al.Effects of poultry manures on the soil Zn content and Zn availability[J].Acta agriculturae boreali-sinica,2011,26(2):186-191(in Chinese with English abstract).
- [49] 王擎运,张佳宝,赵炳梓,等.不同施肥方式对典型壤质潮土中微量元素积累及其有效性的影响[J].土壤学报,2012,49(6):1104-1113.WANG Q Y,ZHANG J B,ZHAO B Z, et al.Influence of different long-term fertilization practices on accumulation and availability of micronutrients in typical loamy fluvo-aquic soil[J].Acta pedologica sinica,2012,49(6):1104-1113(in Chinese with English abstract).
- [50] 朱永永,赵贵宾,熊春蓉,等.全膜垄作侧播栽培模式下主要旱作马铃薯品种营养品质综合评价[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):88-93.ZHU Y Y,ZHAO G B,XIONG C R, et al.A comprehensive evaluation of the nutritional quality of potato varieties in the drought-planting mode under side-seeding on ridge and full plastic-film mulching[J].Agricultural research in the arid areas,2018,36(5):88-93(in Chinese with English abstract).
- [51] 官利兰,陈锐浩,刘小锋,等.黑膜覆盖下两种复合肥对冬作马铃薯产量和品质的影响[J].广东农业科学,2020,47(10):67-72.GUAN L L,CHEN R H,LIU X F, et al.Effects of two kinds of compound fertilizers with black film covering on yield and quality of winter potato in South China[J].Guangdong agricultural sciences,2020,47(10):67-72(in Chinese with English abstract).
- [52] 赵贵宾,朱永永,熊春蓉,等.甘肃省马铃薯铁锌生物强化研究进展[J].中国马铃薯,2019,33(4):243-248.ZHAO G B,ZHU Y Y,XIONG C R, et al.Progress in iron and zinc biofortified potato in Gansu Province[J].Chinese potato journal,2019,33(4):243-248(in Chinese with English abstract).
- [53] 姚春光,白建明,李燕山,等.富锌薯片加工型马铃薯新品种“云薯304”的选育[C]//屈玉冬,陈伊里.马铃薯产业与脱贫攻坚(2018)论文集.哈尔滨:哈尔滨地图出版社,2018:261-263. YAO C G,BAI J M,LI Y S, et al.Breeding of a new potato variety "Yunshu 304" enriched in zinc potato chips[C]//QU Y D,CHEN Y L.Potato industry and poverty reduction (2018). Harbin:Harbin Map Press,2018:261-263(in Chinese).
- [54] BROWN C R,HAYNES K G,MOORE M, et al.Stability and broad-sense heritability of mineral content in potato:zinc[J].American journal of potato research,2011,88(3):238-244.
- [55] HAYNES K G,YENCHO G C,CLOUGH M E, et al.Genetic variation for potato tuber micronutrient content and implications for biofortification of potatoes to reduce micronutrient malnutrition[J].American journal of potato research,2012,89(3):192-198.
- [56] 李辉,白雅梅,宋志军,等.马铃薯高世代无性系锌的稳定性及广义遗传力估算[J].西南农业学报,2019,32(8):1701-1707.LI H,BAI Y M,SONG Z J, et al.Stability and broad-sense heritability of zinc in advanced generation clones of potato[J].Southwest China journal of agricultural sciences,2019,32(8):1701-1707(in Chinese with English abstract).
- [57] 赵明辉,白雅梅,邱彩玲,等.马铃薯二倍体和四倍体栽培种主要品质性状的差异[J].中国马铃薯,2004,18(6):333-337. ZHAO M H,BAI Y M,QIU C L, et al.Difference of main quality traits between diploid and tetraploid cultivated potatoes[J].Chinese potato,2004,18(6):333-337(in Chinese with English abstract).
- [58] 金黎平,杨宏福.马铃薯遗传育种中的染色体倍性操作[J].农业生物技术学报,1996,4(1):70-75.JIN L P,YANG H F.Chromosomal manipulation in potato genetics and breeding[J].Journal of agricultural biotechnology,1996,4(1):70-75(in Chinese with English abstract).
- [59] GARG M,SHARMA N,SHARMA S, et al.Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world[J/OL].Frontiers in nutrition,2018,5:12[2021-04-21].<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29492405/>. DOI: 10.3389/fnut.

2018.00012.

[60] PAGET M, AMOROS W, SALAS E, et al. Genetic evaluation of micronutrient traits in diploid potato from a base population of Andean Landrace cultivars[J]. *Crop science*, 2014, 54(5): 1949-

1959.

[61] HIRSCH C D, BUELL C R, HIRSCH C N. A toolbox of potato genetic and genomic resources[J]. *American journal of potato research*, 2016, 93(1): 21-32.

## Advances on nutritional characteristics of zinc and zinc biofortification in potato

DU Ping<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhuqing<sup>1,2</sup>, SONG Botao<sup>2</sup>, LIU Xinwei<sup>1,2</sup>

1. *Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Key Laboratory of Potato Biology and Biotechnology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*

**Abstract** Zinc is an essential microelement for plants and human body. For a long time, zinc deficiency has been a global public health problem and one of the important factors leading to human disease and death. At present, more than 2 billion people worldwide are facing the health problems caused by zinc deficiency. The population of zinc deficiency in developing countries is particularly serious, and there are as many as 100 million zinc-deficient populations in China. 76% zinc in human body comes from plant food, and low content of zinc in crops is an important cause of zinc deficiency in human body and various symptoms of zinc deficiency or diseases. Therefore, eating natural zinc-rich plant foods is considered to be the basic way to solve the problem of zinc deficiency in human body. Potato is the fourth largest food crop in the world following rice, wheat and corn. It has high yield and rich nutrition. It is cultivated worldwide and is one of the important food sources for human beings, it also has great potential in zinc biofortification. In 2015, China began to implement a potato staple food strategy, aiming to ensure the national food security and adjust the dietary structure of the residents to promote human health. In this context, it is of great significance to study nutritional characteristics of zinc and zinc biofortification in potato to achieve zinc-rich potatoes, and then to improve human zinc nutrition and health through dietary supplements. The nutritive function of zinc in potato, the status of soil zinc in potato production areas, breeding and agronomic fortification was summarized and prospected in this article. It is proposed that zinc plays an important role in growth, yield and quality formation of potato. Agronomic fortification is currently the main technical measure for fortifying zinc nutrition in potato. Breeding fortification requires further discovery and utilization of elite germplasm resources to lay a good germplasm foundation for producing zinc-rich potatoes.

**Keywords** potato; zinc deficiency; zinc-rich potato; zinc biofortification technology; potato staple food; agronomic fortification; breeding fortification

(责任编辑:赵琳琳)