

土壤因子与农产品品质关系研究进展

张宁宁^{1,2} 白雪¹ 欧阳小雪¹ 张孟娟^{1,2} 张强¹
殷萍¹ 张玉婷¹ 阮维斌² 陈秋生^{1*} 程奕^{1*}

(1. 天津市农业科学院 农产品质量安全与营养研究所, 天津 300381;
2. 南开大学 生命科学学院, 天津 300072)

摘要 分析了国内外关于土壤因子与农产品品质关系的研究现状,综述了土壤生物、物理、化学因子在农产品品质形成过程中发挥的重要作用,提出通过土壤管理来调控农产品品质面临的众多问题及未来研究重点,期望通过明晰土壤因子与农产品品质的内在机理,指导土壤管理及标准化生产,为促进特色农产品持续发展和品质提升提供科学依据。

关键词 土壤因子;微生物;农产品品质;土壤管理

中图分类号:O657 文献标志码:A 文章编号:2095-1035(2023)06-0513-11

Research Progress on the Relationship between Soil Factors and Agricultural Product Quality

ZHANG Ningning^{1,2}, BAI Xue¹, OUYANG Xiaoxue¹, ZHANG Mengjuan^{1,2}, ZHANG Qiang¹,
YIN Ping¹, ZHANG Yuting¹, RUAN Weibin², CHEN Qiusheng^{1*}, CHENG Yi^{1*}

(1. Institute of Agricultural Product Quality Safety and Nutrition, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300381, China;
2. College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300072, China)

Abstract This paper analyzes the current research situation of the relationship between soil factors and agricultural product quality at home and abroad, reviews the important roles of soil biological, physical and chemical factors in the formation of agricultural product quality. Also, many problems faced by regulating agricultural product quality through soil management and future research priorities are proposed. Finally, this paper aims to clarify the internal mechanism of soil factors and agricultural product quality, guide soil management and standardized production. The above results will provide scientific basis for promoting the sustainable development and quality improvement of featured agricultural products.

Keywords soil factors; microorganism; agricultural products quality; soil management

随着生活水平的提高,人们的消费需求发生了巨大变化,已经开始由“吃得饱”转为“吃得好”,人们开始更多地关注农产品的品质及产地来源。我国

“十四五”全国农产品质量安全规划明确指出要深入践行新“三品一标”的发展要求,全力推动优质绿色和特色农产品供给,同时加强农产品品质研究,筛选

收稿日期:2023-01-14 修回日期:2023-02-04

基金项目:天津市蔬菜现代农业产业技术体系项目(ITTVRS2021019);天津市农业科学院农产品质量安全与营养研究所项目(ZBS-2020004)

作者简介:张宁宁,女,研究生,主要从事基因工程与现代农业技术研究。E-mail:z17320097735@163.com

* 通信作者:陈秋生,男,研究员,主要从事农产品质量安全研究。E-mail:tjzbscqs@126.com

程奕,女,研究员,主要从事农产品质量安全研究。E-mail:cychengyi99@126.com

引用格式:张宁宁,白雪,欧阳小雪,等.土壤因子与农产品品质关系研究进展[J].中国无机分析化学,2023,13(6):513-523.
ZHANG Ningning, BAI Xue, OUYANG Xiaoxue, et al. Research Progress on the Relationship between Soil Factors and Agricultural Product Quality[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(6): 513-523.

核心品质指标,分年度分区域识别验证主要品质成分差异,探究不同主栽品种、不同优势产区、不同生产方式差异性规律和影响机制,进而强化地理标志产品特色品质保持,引导农产品优质优价,满足人民群众不断升级的消费需求。

农产品的营养品质,特别是一些特征性功能成分,如食物纤维、寡果糖、植物甾醇、类胡萝卜素、类黄酮等,其含量水平高低对于农产品的品牌和价格都有重要影响。而中国地域辽阔,土壤类型和气候类型复杂多样,造成了农产品营养品质差异较大,同时,也形成了众多的特色农产品产区,特征性营养成分提升了特色农产品知名度,促进了当地农业产业的发展,增加了农民收入,加快了乡村振兴的步伐。

土壤是万物之本,生命之源,土壤作为作物的“养分库”,提供作物生长发育所需的各种营养成分。不同类型的土壤具有不同的物理、化学和生物学特性,而这些性质对作物营养品质起着决定性作用^[1]。同一品种作物在不同土壤类型、地域和耕作施肥等条件下显现出较大的品质差异。研究表明,土壤容重、水分、有机质、酸碱度、矿质元素含量以及一些特殊微生物等都会直接影响农产品品质^[2]。因此,全面解析土壤因子与农产品品质之间的关系,明确影响农产品品质和特征性营养成分的关键土壤因子,可以更好地指导优势及特色农产品产业标准化生产,提升区域优势农产品品牌价值,助力乡村振兴。

1 土壤微生物对农产品品质的影响

1.1 微生物在农业领域的研究及应用

土壤中蕴藏着丰富的微生物资源,其群落组成是根据特定环境(物理、化学、生物)的选择与限制而发展的,与植物生长发育密切相关。目前,对农作物根系微生物认识比较全面的有根瘤菌、丛枝菌根和一些病原菌,但这只是土壤微生物中很小的一部分。随着高通量测序、宏基因组学等现代生物技术的指数式发展,土壤微生物分析已进入功能研究阶段,即在海量土壤微生物中分离特殊种类,研究其在作物生长过程中的作用,使得越来越多的新型土壤微生物及功能被发现和认知,为解决全球现代农业发展面临的众多问题提供了新的方法和思路^[3]。

土壤微生物主要通过以下几个方面在农业生产中发挥优势作用:1)减少化学肥料的过度使用,同时又保证作物产量和营养功能。研究表明,根瘤菌、丛

枝菌根、枯草芽孢杆菌、荧光假单胞菌等可以增强作物对氮(N)、磷(P)、钾(K)、锌(Zn)等营养元素的吸收,具有促进作物生长的潜力^[4-6];2)避免农药滥用,通过微生物改善土壤状况,增加拮抗菌,抑制病原菌。研究表明,很多有益微生物与作物之间存在复杂的作用关系,可帮助抵御病原菌感染,提升作物营养品质^[7];3)可解决连作障碍带来的作物病害与品质下降等问题。连作障碍的发生主要是因为土壤环境中真菌结构失衡使作物产量以及可溶性糖、蛋白质、维生素等含量降低,导致品质下降及病害发生^[8]。随着生物技术与市场需求的推动,土壤微生物研究已进入产业化发展阶段,多种菌剂产品已在农业生产中广泛应用,如 Quick Roots 产品应用于小麦、大豆、油菜等作物中,可改善作物对营养元素的吸收,达到增产增质的目的。

1.2 对作物生长代谢的影响

研究发现,植物营养代谢高度依赖其相关的土壤微生物,一些特殊的植物-微生物间相互作用可以引起植物代谢产物或性状的改变,这主要与有益微生物的定植或刺激植物抗毒素和其他与防御相关化合物的产生有关^[9-10]。这些微生物可以通过单一或联合(共接种)作用,影响作物的感官品质(如甜味、苦味、酸度)和营养品质(如矿物质、维生素含量),涉及的微生物包括细菌、放线菌和许多真菌等^[11]。表1列举了接种不同微生物在改善作物特性(如口感、气味)和食用健康(增加健康分子的浓度,如花青素、抗氧化活性)等方面发挥的作用。

2 土壤理化性质对农产品品质的影响

2.1 物理性质

土壤物理性质是土壤的重要组成部分,直接影响土壤养分周转和农产品品质,主要的土壤物理因子包括土壤容重、土壤质地、土壤水分、土壤孔隙等。

2.1.1 土壤容重

土壤容重是土壤重要的物理性质之一,反应土壤压实和孔隙状况,与土壤微生物数量及土壤酶活性显著相关,但并不是土壤本身的固有属性,它受降水量、耕作制度和管理方式等多种因素影响。研究表明,土壤容重与作物生长及营养品质密切相关,容重增大,土壤大孔隙减少,氧气扩散受到限制,土壤中厌氧原核生物和腐生真菌增加,而需氧原核生物减少。这种变化会导致土壤微生物群落及关键 N 循环过程改变,从而影响植物生长所需养分的生物有效性^[28]。作物根系对土壤容重的较小变化也很

敏感,对于不同容重的土壤,作物根系会表现出结构、数量和吸收活力等方面的差异,进而影响作物养分吸收,导致农产品产量和品质出现差异^[29-30]。邹俊等^[31-32]将农产品营养成分与土壤容重进行相关

性分析,发现适宜的较小土壤容重有利于可溶性蛋白、游离氨基酸和丙二醛的合成,淀粉及挥发油的含量随容重降低而减少,而粗纤维、可溶性糖及维生素 C 的含量基本不变。此外,土壤容重也会影响土壤矿

表 1 微生物影响农产品品质的研究案例
Table 1 Case study of microbial influences on the quality of agricultural products

农产品	微生物	品质影响	参考文献
番茄	<i>Rhizoglosum irregular</i> <i>Funneliiformis mosseae</i>	果实中矿物质浓度提升(P 24.7%、Ca 28.2%、Mg 3.7%、Cu 9.8%、Zn 34.2%);可溶性固形物、果实干物质、淀粉、总抗坏血酸、番茄红素分别提升 9.7%、9.7%、31.4%、28.4%、46.7%。	[12]
	<i>Kosakonia radicinicans</i> (DSM 16656)	果实糖酸比显著降低,叶黄素、胡萝卜素和番茄红素含量降低。	[13]
	<i>Trichoderma harzianum</i> AMF (<i>Glomus mosseae</i>)	与未接种相比,番茄红素含量增加 14%,抗氧化活性、维生素 C 及总黄酮含量没有太大变化。	[14]
萝卜	<i>Trichoderma harzianum</i> strain T22 <i>T. virens</i> strain GV41,	总抗坏血酸增加;叶片中矿物质积累(K、Ca、P)增加。	[15]
生菜	<i>Bacillus methylotrophicus</i> KE2	提高鲜重及叶宽,蛋白质浓度增加 5.19 mg/g(干重),蔗糖、葡萄糖浓度降低,果糖浓度增加 8.6%。K、Mg、Na、P、Fe、Zn 含量积累增加。	[16]
黄瓜	<i>Pseudomonas paralactis</i> (KBend6p7) <i>Sinorhizobium meliloti</i> (KBect6p6) <i>Acinetobacter radioresistens</i>	植株高度、生物量增加;酚类物质、类黄酮、抗氧化能力、维生素 C 增加,分别最多可增加 73%、126%、47%、112%。	[17]
辣椒	<i>Bacillus megaterium</i> (CDK25)	粗纤维(3.31%)、粗蛋白(3.84%)和灰分(2.53%)含量显著提高。	[18]
豌豆	<i>Bacillus subtilis</i> BHHU100 <i>Trichoderma harzianum</i> TNHU27 <i>Pseudomonas aeruginosa</i> PJHU15	种子和果皮中的总酚、类黄酮、抗坏血酸和蛋白质含量显著增加。	[19]
草莓	<i>Rhizobium</i> (PEPV16) <i>Phyllobacterium</i> (PEPV15)	接种 PEPV16 或 PEPV15 草莓中柠檬酸、维生素 C 和儿茶素含量显著增加;但花青素及对香豆素衍生物含量,接种 PEPV16 增加,接种 PEPV15 减少。	[20]
	<i>Funneliiformis mosseae</i> (Fm)(BEG12) <i>Septoglosum viscosum</i> , (Sv) <i>Rhizophagus irregularis</i> (Ri) (DAOM197-198) <i>Pseudomonas</i> sp. (19Fv1t, 5Vm1K and Pf4)	花青素浓度受到联合接种 AMF 和细菌影响,pH 值、挥发性化合物、可滴定酸以及元素含量都分别受到 AMF 和细菌的影响。	[21]
	<i>Pseudomonas fluorescens</i> bv. C7, <i>Pseudomona</i> sp. 19Fv1T	葡萄糖和果糖、苹果酸、柠檬酸和抗坏血酸、β-胡萝卜素和叶黄素浓度增加;番茄红素浓度降低。	[22]
	<i>P. fluorescens</i> N21.4	诱导类黄酮合成,进而调节花青素、儿茶素和黄酮醇的积累,提升黑莓质量。	[23]
椰枣	<i>Actinobacteria</i>	果糖、葡萄糖和总可溶性糖水平增加,酚类、黄酮类氨基酸、饱和脂肪酸及不饱和脂肪酸的含量变化因品种而异,此外,放线菌处理诱导了椰枣的抗氧化、抗菌和抗癌等生物活性。	[24]
玉米	AM fungi <i>Pseudomonas fluorescens</i> Pf4	产量提升,细菌接种增加了籽粒中淀粉含量,AMF 接种增加了蛋白质含量,尤其是玉米醇溶蛋白。	[25]
	<i>Bacillus pumilus</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Bacillus mojavensis</i>	不同处理,玉米籽粒亮度、蛋白质含量(分别提升 43%、37%、30%)、纤维含量(分别提升 95%、86%、71%)存在显著差异,而对籽粒质地、大小和灰分含量没有统计学影响。	[26]
	<i>Serratia marcescens</i> RRN II 2 <i>Pseudomonas</i> sp RRC I 5	粒重、粒数、收获指数、过氧化氢酶活性、脯氨酸、叶绿素、类胡萝卜素含量及微量元素 Zn、Fe 含量均显著提升。	[27]
甘蔗	<i>Unidentified_Acidobacteria</i> , <i>Gaiella</i> , <i>Unidentified_Nitrospiraceae</i> , <i>Dongia</i> <i>Acidibacter</i> , <i>unidentified_Acidimicrobiia</i> , <i>Unidentified_Gemmatimonadaceae</i>	其丰度与木犀草素、芹菜素、异黄酮、橙皮素含量正相关。 其丰度与木犀草素、甘氨酸、芹菜素、异黄酮、橙皮素含量负相关。	[9]

质元素的运移及作物的光合作用,目前,关于土壤容重与作物 N、P、K 吸收积累、品质提升的研究主要集中在玉米^[33]、大豆^[34]、花生^[35]、小麦^[36]等作物,几种作物的矿质元素积累和产量随土壤容重增加表现出类似的变化趋势,即先上升后下降,且各种作物不同器官间元素积累受土壤容重的影响也不尽相同。

2.1.2 土壤质地

土壤质地是土壤中各粒级土粒含量的百分率组合,又称为机械组成,我国将土壤分为砂土、壤土及黏土 3 大类。人们常说的“因土种植”其实就是依据土壤质地等重要参数,选择合适的农作物栽种于合适的土壤环境中,如小麦、玉米、大豆、油菜等更适宜黏壤土,而萝卜、甘蓝、葡萄等更适合在砂壤土中生长。不同质地土壤的机械阻力、颗粒组成和孔隙度不同,影响土壤的水分、空气、热量和营养状况,进而影响了作物根系、地上部分的生长发育以及土壤中微生物的种类和数量。对于含水量及孔隙度相同的土壤,质地较粗的土壤中细菌的多样性更高^[37]。土壤质地对多种作物产量、株高、根系生长以及蛋白质合成、蔗糖代谢、淀粉合成、叶绿素含量、总酚、类黄酮、花色苷、植株含水率等生理生化特性都有一定影响。TRAMONTINI 等^[38-39]研究发现,不同土壤质地会影响葡萄果实中酚类、黄酮类物质的含量和种类,进而影响其色泽口感,其中砂壤土更有利于葡萄果实的生长发育与营养物质积累。钱华等^[40]对土壤质地与烟叶中的中性致香物质含量和品质进行了相关性研究,结果显示,与黏土相比,砂壤土中烟叶的化学成分协调性及感官质量最好,浓香型风格与焦甜感也更为显著,烟叶各致香物质含量会随土壤沙性减弱而表现出逐渐降低的趋势,表明砂壤土更有利于烟叶品质的形成。梁太波等^[41]针对土壤质地与小麦籽粒的营养品质和加工品质进行了相关研究,发现小麦蛋白质含量随土质黏重程度的提高表现为先增加后减少的趋势。在小麦籽粒灌浆期,土壤质地会通过影响淀粉合成关键酶的活性调控籽粒中淀粉含量。因此,在气候因素相似的情况下,土壤质地是决定作物品质优劣的重要因素。

2.2 化学性质

2.2.1 pH 值

pH 值反应土壤溶液中氢离子的浓度,是土壤重要的化学性质之一,土壤 pH 值的变化会引起土壤中各种营养元素溶解度的变化,它决定了养分的可获得性和土壤的物理条件,并会影响土壤中微生物

的多样性。当作物在非最佳 pH 值下生长时,它们对营养元素的吸收和利用差异会很大,严重影响植物的生长发育^[42]。国内外关于土壤 pH 值与农产品品质方面的报道已有很多。梁卫青等^[43]通过研究前胡有效成分含量与多个土壤因子的关系,发现 pH 值是影响前胡有效成分的主导土壤因子之一,与前胡中白花前胡乙素、白花前胡素 E 和 7-羟基香豆素含量呈正相关,而与总香豆素和白花前胡甲素含量呈负相关。翟娟园等^[44]研究发现 pH 值影响川白芷中欧前胡素和异欧前胡素的含量,并且在土壤 pH 值变化范围内,pH 值与欧前胡素和异欧前胡素含量呈正相关,由此可见,适宜的土壤 pH 值更有利于药材次生代谢物质的积累,进而影响药材质量。此外,李银科等^[45-46]发现烤烟适宜生长的土壤 pH 值为 5~7,pH 值过高或过低都会影响烟叶中还原糖、游离氨基酸、多酚、类胡萝卜素等化学物质的含量及植株的根系活力和干物质积累,GALLEGOS-CEDILLO 等^[47]研究表明蓝莓适宜生长在轻质酸性土壤中,最适 pH 值在 4.0~5.5,pH 值升高将导致蓝莓营养失衡、叶片缺铁(Fe)、缺锰(Mn)失绿和叶绿素含量降低,而 JIANG 等^[48]的研究结果也与上述一致,发现随土壤 pH 值增加,两个品种的蓝莓叶绿素含量和净光合速率都呈现出下降趋势,同时蓝莓的可溶性固形物(TSS)和可溶性固形物与可滴定酸比值(TSS:TA)降低,导致果实品质下降,进一步影响蓝莓的食用口感。

2.2.2 有机质

土壤有机质(SOM)由动植物遗骸的有机残留物和分解或腐殖化的微生物产物组成,是反应土壤肥力的关键指标。根据有机质在不同 pH 值下的溶解度,可将其分为生物聚合物(BP)、黄腐酸(FA)、腐殖酸(HA)和腐殖素。研究发现,有机质通过改变土壤弹性和团聚体数量、压实性以及孔隙度改善土壤结构和稳定性。增加土壤有机质含量,可以调节土壤持水力、微生物生物量、土壤总 N、阳离子交换量等土壤特性,促进植物根系抗氧化酶活性和碳循环,增强土壤养分供应能力和植物光合特性,进而影响作物生长及营养物质形成^[49-50]。CHOI 等^[51]研究表明,有机质含量的升高显著提高了苹果果实内苹果酸合成酶活性以及可溶性糖和微量元素含量,改善了果实的色泽和风味。MAUROMICALE 等^[52]通过向日晒土壤中补充有机质,使番茄的果皮厚度、硬度及红度分别提高了 19%、36%、24%,并且果实内还原糖、可溶性固形物及可滴定酸的含量

也有较大程度的增加。另外,土壤有机质含量与烤后烟叶中绿原酸含量呈显著负相关,这在贵州中部山区和武陵山区两个区域都得到了验证,且结果显示土壤有机质对不同区域烟叶酚类物质的影响存在一致性,而对烟叶中 β -胡萝卜素、叶黄素、还原糖含量以及糖碱比的作用则存在区域差异性,从而造成了烟叶品质上的差异^[53]。综上,有机质对作物品质形成有很多有益的作用,但也存在不同区域有机质对作物生长影响存在差异的问题,同时也有研究发现在高水平土壤有机质下生长的作物也可能更容易受到干旱胁迫的影响^[54],因此针对不同地域,有机质的添加和含量控制并不能一概而论,而是应该有针对性的衡量。

2.2.3 营养元素

氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)是农产品品质形成过程中重要的营养元素,特别是在果实形成和发育的关键阶段,只有从土壤中获得充足的营养,才能生产高产优质的农产品。N是植物中最重要的元素,与其他营养元素相比,在植物体内具有更高的浓度,一般可达3%~4%,它是许多植物结构及其内部和外部代谢的核心成分,与蛋白质、核酸、叶绿素及多种激素的合成有关,对作物品质的影响很大。研究表明,适量的N可促进作物的光合作用,增强对生物胁迫的抵抗力,改善干物质积累和养分吸收,提升产量^[55-56]。此外,施用适宜用量的N可激活作物生理代谢过程中多种酶的活性,导致柑橘和石榴果实中可溶性固形物、维生素C、总糖含量增加,但其用量过多时也会使这些指标下降,造成果实质量降低^[57]。P是作物体内核酸、核蛋白、磷脂和植素等有机化合物的组成成分,P缺乏会导致叶片呈红色或紫色,顶部生长受阻,产量下降。研究发现,P缺乏会使绿茶的品质下降,茶叶中总多酚、类黄酮、游离氨基酸浓度降低,而多酚类物质与总游离氨基酸的比例和水溶性糖浓度增加,导致缺P绿茶味道更涩,鲜味更少,更清淡^[58]。K是参与植物新陈代谢、促进碳水化合物、脂肪和蛋白质合成的一种基本矿物质,显著影响作物的营养成分组成。KASHYAP等^[59]研究表明,在不同水平施K条件下,石榴果实中的维生素C含量随K施用量的增加而增加,但当施用量超过500 g/株时,果实产量、可溶性固形物及总糖含量表现出减少趋势,对石榴的果实品质产生负面影响。另外,K也可以增加植物对非生物及生物因素的抵抗力,如霜冻、干旱、盐度和碱度,即使在胁迫条件下,K充足的植物也能更

好地生长^[60-62]。

Ca对细胞壁、细胞生长、N同化和作为某些酶的辅因子是必不可少的,有助于保护植物免受病害侵扰,促进作物根系早期的生长和发育,Ca缺乏不仅会导致作物生理紊乱,产量下降,还会影响呼吸速率、维生素C含量和果实硬度等,尤其在鲜食水果中更为显著^[63-65]。研究发现,叶面喷施Ca促进了苹果果实中糖分和淀粉的积累,增加了甜樱桃中蔗糖含量^[66-67]。Mg参与光合作用、碳水化合物代谢、核酸合成,并且可以刺激P的吸收运输和激活多种酶^[68]。研究表明,Mg对萝卜和甜瓜的生长及生理特性有显著影响,在一定范围内,随着土壤Mg含量增加,萝卜植株中可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C含量不断增加,而粗纤维含量逐渐减少。此外,甜瓜中叶绿素b、类胡萝卜素、蛋白质含量也与土壤镁浓度呈正相关^[69-70]。

2.2.4 微量元素

作物对微量元素的需要量很少,但它们是作物正常生长发育不可缺少的元素,是作物体内酶或辅酶的组成成分,具有很强的专一性。研究表明,作物根茎中微量元素与土壤中微量元素既有拮抗作用又有协同作用,适当施用微量元素肥料,对多种作物有一定的增产作用,且有利于品质改善^[71]。

锌(Zn)、锰(Mn)、硼(B)等都是重要的微量营养素,在作物生长和代谢中具有重要作用。在植物中,Zn调节蛋白质、生长素合成、维持细胞膜结构和功能,也是某些重要酶的成分和激活剂,对植物耐非生物胁迫所需的基因表达至关重要^[68]。Zn缺乏主要发生在世界各地水稻、玉米、小麦等主食的种植区。缺Zn不仅影响作物生长、还会降低作物质量,进而影响人类健康^[72]。在缺Zn地区,可通过土壤施Zn和叶面喷施来提高作物中Zn的生物有效性^[73]。研究表明,适宜的Zn水平增加了杂交水稻总干物质积累,并且将更多的干物质分配到穗中,提高了收获指数^[74]。Mn主要参与植物光合作用的几种代谢过程,是多种酶的辅因子。土壤缺Mn或过量都会对作物光合作用产生负面影响^[75]。因此,Mn肥的施用可通过改善植物营养状况和光合效率提高作物的品质性状^[76]。Mn在水稻生长、产量及香气形成中具有重要作用,随着Mn水平上升,水稻籽粒Mn含量、脯氨酸、可溶性蛋白及芳香物质含量显著提高^[77];同时,Mn在增加菠菜生长特性、叶片色素、蛋白质浓度及马铃薯干物质积累等方面也发挥着重要作用^[78]。B参与作物体内糖运输、水分转

运、激素激活等代谢活动, B 缺乏会造成光合产物及碳水化合物从叶片到果实的移动减少, 影响作物生长及产量^[79]。研究发现, B 缺乏会导致棉花糖浓度下降和脱铃, 适量增加 B 含量, 棉花生长、产量和纤维质量会得到改善^[80]。此外, 施用一定量的 B 也可增加玉米、大豆的抗氧化活性及芝麻、向日葵的理论含油量, 提高食物营养价值 and 经济效益^[81-84]。

3 讨论

大量研究表明, 为特定作物提供合适的根系微生物可以提高农产品的营养价值, 但同时我们也需要考虑几个方面的问题。首先, 作物与微生物的互惠关系主要取决于作物基因型, 即作物品种是我们选择适宜微生物的主要决定因素, 而非土壤中的其他生物与非生物因素。其次, 即使是同一品种作物, 相同的微生物或微生物组合也会表现出不同的作用, 所以作物与微生物之间的这种互惠关系也会受到环境因素的影响。另外, 有益微生物的应用也可能存在有害方面, 即一些微生物对作物品质可能产生双重影响。在种植过程中, 可以外源添加含有益微生物的商业接种剂或原位调控微生物群来改善作物根系微生物环境, 但目前对后者的研究仍然不够。有学者认为, 要实现原位调控土壤微生物群, 我们还需要对相关理论和技术进一步研究: 1) 不同种类作物根系微生物的特征研究; 2) 作物根系微生物群与品质之间的关系; 3) 作物和微生物用于双向通信的分子识别信号; 4) 开发可持续的生物化学和工程技术, 以促进有益微生物群的活动等^[85]。因此, 未来我们仍然需要在这些方面作出更多的努力, 为土壤微生物群的合理改善提供坚实的理论基础。

另外, 土壤中的各种营养元素含量及配比控制在适宜范围内也非常重要, 土壤中 K/Ca、K/Mg 和 Ca/Mg 的含量比例对柚子的果皮厚度、榨汁率及糖酸比有显著影响^[68]。同时, 也有大量研究探讨了营养元素联合施肥与单独施用对农产品品质影响的差异, 结果表明 Zn 和 Fe 联合比单独施用不仅会提高小麦和玉米的产量及 Fe、Zn、Ca、叶绿素和淀粉等的含量, 也会降低小麦中面筋的浓度^[86-87]。在施 N 的同时使用 Mn 和钼(Mo)进行叶面喷施, 将会减少菠菜中 NO_3^- 积累, 增加植株鲜重、叶片面积及叶片中叶绿素、类胡萝卜素、蛋白质含量, 提升菠菜质量^[78]。联合施用的手段不仅可以提升作物产量和品质, 也有利于作物种植系统的可持续发展, 是未来土壤元素调控的研究重点。而对于一些元素缺乏的

问题, 除了考虑供应不足之外, K、Ca、Mg 的缺乏也有可能是互为拮抗的结果^[63,68]。因此, 在作物生产过程中, 针对作物缺乏特定元素, 我们不能将目光只限于改善肥料计划, 还应认识到元素之间拮抗作用的存在, 从而进行合理的施肥管理。此外, 一些微量营养元素的缺乏很难控制且使用昂贵, 如 Fe 和 Mn, 施用后由于其快速氧化而效率很低。因此, 控制这些元素缺乏可能还需要探索另外的方法, 如通过在分子水平上进行深入研究, 正确评估作物品种在 Fe 和 Mn 应用方面的遗传变异, 培育适合特定土壤类型的作物品种。同时, 我们也应看到, 虽然目前矿肥的利用已为农产品发展带来了品质上的较大提升, 但同时也给环境造成了巨大压力。所以, 在既要保证作物高产和品质提优, 又要保证生态环境安全的前提下, 如何科学合理的调控土壤营养元素仍然是 21 世纪的巨大挑战。

4 总结与展望

综合前人研究, 理论上可以在调查田间土壤微生物群落及理化特性的基础上, 选择最适宜生长的作物或通过调控手段来提升作物品质。但由于气候条件、地理状况及土壤中生物和非生物因素的可变性以及复杂的相互作用, 可能并不会得到一个理想状态下的普遍结果。因此, 必须充分认识到土壤中存在的各种相互作用也是影响作物生长的重要因素, 并且在特定的背景下, 综合分析特定的植物、微生物、地域条件及气候特征等。同时, 随着社会发展, 在人民消费水平不断升级且电商行业迅速发展的大背景下, 大众对农产品的需求也更加倾向于原产地特色农产品, 更加关注农产品的营养品质。因此, 在充分了解土壤质地状况, 通过种植管理来提升农产品营养品质的基础上, 也必须考虑一些无法改变的土壤结构、气候特征等地域因素在农产品品质形成过程中发挥的重要作用。因此, 要鼓励科研工作者及农业基层部门在保护当地特色农业产业基础上, 积极引入新品种, 优化、筛选适宜当地土壤及环境条件的优良品种, 给当地优质农业发展与农民增收创造更多新的可能。

参考文献

- [1] MAURYA S, ABRAHAM J S, SOMASUNDARAM S, et al. Indicators for assessment of soil quality: a mini-review[J]. Environ Monit Assess, 2020, 192(9): 604. doi:10.1007/s10661-020-08556-z.

- [2] 孙琛梅,程冬冬,杨越超,等.土壤肥力质量与苹果生长、产量及品质关系的研究进展[J].中国土壤与肥料,2022(2):207-215.
SUN Chenmei, CHENG Dongdong, YANG Yuechao, et al. Research progress of the relationship between soil fertility quality and the growth, yield and quality of apple[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(2): 207-215.
- [3] 白洋,钱景美,周俭民,等.农作物微生物组:跨越转化临界点的现代生物技术[J].中国科学院院刊,2017,32(3):260-265. doi:10.16418/j.issn.1000-3045.2017.03.006.
BAI Yang, QIAN Jingmei, ZHOU Jianmin, et al. Crop microbiome: breakthrough technology for agriculture[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(3): 260-265. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2017.03.006.
- [4] MUMTAZ M Z, AHMAD M, JAMIL M, et al. Zinc solubilizing bacillus spp. potential candidates for biofortification in maize[J]. Microbiol Res, 2017, 202: 51-60. DOI:10.1016/j.micres.2017.06.001.
- [5] RENAN O P, NIVALDO S, RAFAEL C M, et al. Growth analysis of sugarcane inoculated with diazotrophic bacteria and nitrogen fertilization[J]. African Journal of Agricultural Research, 2016, 11(30): 2786-2795. DOI:10.5897/ajar2016.11141.
- [6] BASLAM M, PASCUAL I, SANCHEZ-DIAZ M, et al. Improvement of nutritional quality of greenhouse-grown lettuce by arbuscular mycorrhizal fungi is conditioned by the source of phosphorus nutrition[J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(20): 11129-40. DOI: 10.1021/jf202445y.
- [7] MENDES R, KRUIJT M, DE BRUIJN I, et al. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria[J]. Science, 2011, 332(6033): 1097-1100. DOI:10.1126/science.1203980.
- [8] SUN K N, FU L Y, SONG Y, et al. Effects of continuous cucumber cropping on crop quality and soil fungal community[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(7): 436. DOI:10.1007/s10661-021-09136-5.
- [9] HUANG W J, SUN D L, CHEN L J, et al. Integrative analysis of the microbiome and metabolome in understanding the causes of sugarcane bitterness[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 6024. DOI:10.1038/s41598-021-85433-w.
- [10] BADRI D V, ZOLLA G, BAKKER M G, et al. Potential impact of soil microbiomes on the leaf metabolome and on herbivore feeding behavior[J]. New Phytol, 2013, 198(1): 264-273. DOI: 10.1111/nph.12124.
- [11] BONA E, LINGUA G, TODESCHINI V. Effect of bioinoculants on the quality of crops, in bioformulations: for sustainable agriculture[M]. New Delhi: Springer India, 2016: 93-124.
- [12] CARILLO P, KYRATZIS A, KYRIACOU M C, et al. Biostimulatory action of arbuscular mycorrhizal fungi enhances productivity, functional and sensory quality in 'Piennolo del Vesuvio' cherry tomato landraces[J]. Agronomy, 2020, 10(6): 911. DOI: 10.3390/agronomy10060911.
- [13] BERGER B, BALDERMANN S, RUPPEL S. The plant growth-promoting bacterium *Kosakonia radicincitans* improves fruit yield and quality of *Solanum lycopersicum*[J]. J Sci Food Agric, 2017, 97(14): 4865-4871. DOI:10.1002/jsfa.8357.
- [14] NZANZA B, MARAIS D, SOUNDY P. Yield and nutrient content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) as influenced by *Trichoderma harzianum* and *Glomus mosseae* inoculation[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 144: 55-59. DOI:10.1016/j.scienta.2012.06.005.
- [15] FIORENTINO N, VENTORINO V, WOO S L, et al. *Trichoderma*-based biostimulants modulate rhizosphere microbial populations and improve N uptake efficiency, yield, and nutritional quality of leafy vegetables[J]. Front Plant Sci, 2018, 9: 743. DOI: 10.3389/fpls.2018.00743.
- [16] RADHAKRISHNAN R, LEE I J. Gibberellins producing *Bacillus methylotrophicus* KE2 supports plant growth and enhances nutritional metabolites and food values of lettuce[J]. Plant Physiol Biochem, 2016, 109: 181-189. DOI:10.1016/j.plaphy.2016.09.018.
- [17] ZAPATA-SIFUENTES G, HERNANDEZ-MONTIEL L G, SAENZ-MATA J, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and fruit quality of cucumber under greenhouse conditions[J]. Plants (Basel), 2022, 11(12): 1612. DOI:10.3390/plants11121612.
- [18] BHATT K, MAHESHWARI D K. *Bacillus megaterium* strain CDK25, a novel plant growth promoting bacterium enhances proximate chemical and nutritional composition of *capsicum annuum* L[J]. Front Plant Sci, 2020, 11: 1147. DOI:10.3389/fpls.2020.01147.
- [19] JAIN A, SINGH A, CHAUDHARY A, et al. Modulation of nutritional and antioxidant potential of seeds and pericarp of pea pods treated with microbial consortium[J]. Food Res Int, 2014, 64: 275-282. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.06.033.

- [20] FLORES-FELIX J D, VELAZQUEZ E, GARCIA-FRAILE P, et al. *Rhizobium* and *Phyllobacterium* bacterial inoculants increase bioactive compounds and quality of strawberries cultivated in field conditions[J]. Food Res Int, 2018, 111: 416-422. DOI: 10. 1016/j. foodres. 2018. 05. 059.
- [21] TODESCHINI V, AITLAHMIDI N, MAZZUCCO E, et al. Impact of beneficial microorganisms on strawberry growth, fruit production, nutritional quality, and volatiles[J]. Front Plant Sci, 2018, 9: 1611. DOI: 10. 3389/fpls. 2018. 01611.
- [22] BONA E, TODESCHINI V, CANTAMESSA S, et al. Combined bacterial and mycorrhizal inocula improve tomato quality at reduced fertilization [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 234: 160-165. DOI: 10. 1016/j. scientia. 2018. 02. 026.
- [23] GARCIA-SECO D, ZHANG Y, GUTIERREZ-MANERO F J, et al. Application of *Pseudomonas fluorescens* to blackberry under field conditions improves fruit quality by modifying flavonoid metabolism [J]. PLoS One, 2015, 10(11): e0142639. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0142639.
- [24] ABDELGAWAD H, SALEH A M, AL JAOUNI S, et al. Utilization of actinobacteria to enhance the production and quality of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits in a semi-arid environment [J]. Science of The Total Environment, 2019, 665: 690-697. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2019. 02. 140.
- [25] BERTA G, COPETTA A, GAMALERO E, et al. Maize development and grain quality are differentially affected by mycorrhizal fungi and a growth-promoting *Pseudomonas* in the field[J]. Mycorrhiza, 2014, 24(3): 161-170. DOI: 10. 1007/s00572-013-0523-x.
- [26] KATSENIOS N, ANDREOU V, SPARANGIS P, et al. Assessment of plant growth promoting bacteria strains on growth, yield and quality of sweet corn[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 11598. DOI: 10. 1038/s41598-022-16044-2.
- [27] KHAN A, SINGH A V. Multifarious effect of ACC deaminase and EPS producing *Pseudomonas* sp. and *Serratia marcescens* to augment drought stress tolerance and nutrient status of wheat [J]. World J Microbiol Biotechnol, 2021, 37(12): 198. DOI: 10. 1007/s11274-021-03166-4.
- [28] LONGEPierre M, FEOLA CONZ R, BARTHEL M, et al. Mixed effects of soil compaction on the nitrogen cycle under pea and wheat [J]. Front Microbiol, 2021, 12: 822487. DOI: 10. 3389/fmicb. 2021. 822487.
- [29] 李潮海, 李胜利, 王群, 等. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响[J]. 中国农业科学, 2005(8), 1706-1711.
- LI Chaohai, LI Shengli, WANG Qun, et al. A study on corn root growth and activities at different soil layers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005(8): 1706-1711.
- [30] TRACY S R, BLACK C R, ROBERTS J A, et al. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography [J]. Ann Bot, 2012, 110(2): 511-519. DOI: 10. 1093/aob/mcs031.
- [31] 邹俊, 刘丽, 郭巧生, 等. 土壤容重对活血丹生长、生理及药材品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(19): 3848-3854. DOI: 10. 19540/j. cnki. cjcm. 20180726. 002.
- ZOU Jun, LIU Li, GUO Qiaosheng, et al. Effects of soil bulk density on growth, physiology and quality of *Glechoma longituba* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(19): 3848-3854. DOI: 10. 19540/j. cnki. cjcm. 20180726. 002.
- [32] 尚庆文, 徐坤, 孔祥波, 等. 土壤容重对生姜生长及产量和品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2006(11), 18-20.
- SHANG Qingwen, XU Kun, KONG Xiangbo, et al. Effect of soil bulk density on the growth, yield and quality of ginger [J]. China Vegetable, 2006(11): 18-20.
- [33] 郑存德, 程岩. 容重对玉米植株养分吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1541-1545. DOI: 10. 16213/j. cnki. sejas. 2013. 04. 057.
- ZHENG Cunde, CHENG Yan. Effect of soil bulk density on nourishment absorption of maize [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(4): 1541-1545. DOI: 10. 16213/j. cnki. sejas. 2013. 04. 057.
- [34] 张喜亭, 曹立为, 吕书财, 等. 黑土容重大豆氮素吸收及产量的影响[J]. 作物杂志, 2017(3): 132-137. DOI: 10. 16035/j. issn. 1001-7283. 2017. 03. 024.
- ZHANG Xiting, CAO Liwei, LYU Shucui, et al. Effects of bulk density on nitrogen absorption and yield of soybean on black soil [J]. Crops, 2017(3): 132-137. DOI: 10. 16035/j. issn. 1001-7283. 2017. 03. 024.
- [35] 张亚如, 崔洁亚, 侯凯旋, 等. 土壤容重对花生结荚期氮、磷、钾、钙吸收与分配的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(6): 198-204.
- ZHANG Yaru, CUI Jieya, HOU Kaixuan, et al. Effects of soil bulk density on nitrogen, phosphorus, potassium and calcium uptake and distribution in peanut pod bearing stage [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(6): 198-204.

- [36] 孙泽强,韩成卫,孔晓民,等.鲁西南褐土土壤容重对冬小麦生长发育及养分吸收的影响[J].山东农业科学,2020,52(11):69-74. DOI: 10. 14083/j. issn. 1001-4942. 2020. 11. 014.
- SUN Zeqiang, HAN Chengwei, KONG Xiaomin, et al. Effect of cinnamon soil bulk density on growth, development and nutrient uptake of wheat in Southwest of Shandong province [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(11): 69-74. DOI: 10. 14083/j. issn. 1001-4942. 2020. 11. 014.
- [37] CHAU J F, BAGTZOGLOU A C, WILLIG M R. The effect of soil texture on richness and diversity of bacterial communities [J]. Environmental Forensics, 2011, 12(4): 333-341. DOI: 10. 1080/15275922. 2011. 622348.
- [38] TRAMONTINI S, VAN LEEUWEN C, DOMEK J C, et al. Impact of soil texture and water availability on the hydraulic control of plant and grape-berry development[J]. Plant and Soil, 2012, 368(1-2): 215-230. DOI: 10. 1007/s11104-012-1507-x.
- [39] 程军,李进,刘晶晶,等.土壤质地对‘赤霞珠’葡萄酚类物质积累及葡萄酒色泽稳定性的影响[J].中外葡萄与葡萄酒,2022(3):50-54. DOI: 10. 13414/j. cnki. zwpp. 2022. 03. 008.
- CHENG Jun, LI Jin, LIU Jingjing, et al. Influence of soil texture on phenols accumulation in grape berry and wine color stability [J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2022(3): 50-54. DOI: 10. 13414/j. cnki. zwpp. 2022. 03. 008.
- [40] 钱华,杨军杰,史宏志,等.豫中不同土壤质地烤烟烟叶中性致香物质含量和感官质量的差异[J].中国烟草学报,2012,18(6):17-22.
- QIAN Hua, YANG Junjie, SHI Hongzhi, et al. Comparison of neutral aroma components and sensory quality between flue-cured tobacco leaves from different soil textures in central Henan province[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(6): 17-22.
- [41] 梁太波.土壤质地与供氮水平对小麦产量和品质的影响及其生理基础[D].泰安:山东农业大学,2008.
- LIANG Taibo. Effects of soil texture and nitrogen rates on yield and quality and the physiological basis of wheat[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008.
- [42] CALVO-POLANCO M, ZHANG W, ELLEN MACDONALD S, et al. Boreal forest plant species responses to pH: ecological interpretation and application to reclamation[J]. Plant and Soil, 2017, 420(1/2): 195-208. DOI: 10. 1007/s11104-017-3356-0.
- [43] 梁卫青,胡轶娟,浦锦宝,等.前胡有效成分含量与土壤因子的相关性分析[J].中国现代应用药学,2021,38(11):1302-1308. DOI: 10. 13748/j. cnki. issn1007-7693. 2021. 11. 004.
- LIANG Weiqing, HU Yijuan, PU Jinbao, et al. Correlation analysis between active ingredients contents and soil factors in peucedani radix[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2021, 38(11): 1302-1308. DOI: 10. 13748/j. cnki. issn1007-7693. 2021. 11. 004.
- [44] 翟娟园,吴卫,廖凯,等.土壤环境对川白芷产量和品质的影响研究[J].中草药,2010,41(6):984-988.
- ZHAI Juanyuan, WU Wei, LIAO Kai, et al. Effects of soil factors on yield and quality of Angelica dahuricavar. formosana[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2010, 41(6): 984-988.
- [45] 李银科,王菲,羊波,等.土壤pH值对烟叶化学成分和品质的影响[J].江苏农业科学,2013,41(12):98-100. DOI: 10. 15889/j. issn. 1002-1302. 2013. 12. 101.
- LI Yinke, WANG Fei, YANG Bo, et al. The effect of soil pH on the chemical composition and quality of tobacco leaves[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(12): 98-100. DOI: 10. 15889/j. issn. 1002-1302. 2013. 12. 101.
- [46] HOU Z W, ZHOU B, YANG J M, et al. Effects of soil pH on growth and dry matter accumulation of tobacco plants[J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(8): 1443-1447. DOI: 10. 16175/j. cnki. 1009-4229. 2017. 08. 020.
- [47] GALLEGOS-CEDILLO V M, ÁLVARO J E, CAPATOS T, et al. Effect of pH and silicon in the fertigation solution on vegetative growth of blueberry plants in organic agriculture [J]. HortScience, 2018, 53(10): 1423-1428. DOI: 10. 21273/hortsci13342-18.
- [48] JIANG Y Q, ZENG Q L, WEI J G, et al. Growth, fruit yield, photosynthetic characteristics, and leaf microelement concentration of two blueberry cultivars under different long-term soil pH treatments [J]. Agronomy, 2019, 9(7): 357. DOI: 10. 3390/agronomy9070357.
- [49] ZHANG Z B, CHEN Q, CHENG M Y, et al. The effects of organic matter on the physiological features of Malus hupehensis seedlings and soil properties under replant conditions [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 146: 52-58. DOI: 10. 1016/j. scienta. 2012. 08. 011.
- [50] PARADELO R, BARRAL M T. Influence of organic matter and texture on the compactability of Technosols[J]. Catena, 2013, 110: 95-99. DOI: 10. 1016/j. catena. 2013. 05. 012.

- [51] CHOI H S, ROM C R, GU M. Effects of different organic apple production systems on seasonal nutrient variations of soil and leaf[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129 (1): 9-17. DOI: 10. 1016/j. scienta. 2011. 02. 009.
- [52] MAUROMICALE G, LONGO A M G, MONACO A L. The effect of organic supplementation of solarized soil on the quality of tomato fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(2): 189-196. DOI: 10. 1016/j. scienta. 2011. 03. 024.
- [53] 尚斌. 不同区域土壤有机质分布特征及其与烟叶致香物质关键指标的关系研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- SHANG Bin. Theresearch of distribution characteristics of soil organic matter in different areas and its relationship with the key index of tobacco flavor matters[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [54] BATES A J, SADLER J P, GRESWELL R B, et al. Effects of varying organic matter content on the development of green roof vegetation: a six year experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 301-310. DOI: 10. 1016/j. ecoleng. 2015. 04. 102.
- [55] HUSSAIN S, KHAN F, CAO W D, et al. Seed priming alters the production and detoxification of reactive oxygen intermediates in rice seedlings grown under sub-optimal temperature and nutrient supply[J]. *Front Plant Sci*, 2016 (7): 439. DOI: 10. 3389/fpls. 2016. 00439.
- [56] YUAN W L, YUAN S Y, WANG Q F, et al. Effect of different amount of N-fertilizers on growth, root yield and nitrate content of white radishes in Southern China[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2014(12): 302-304.
- [57] GARHWAL P C, YADAV P K, SHARMA B D, et al. Effect of organic manure and nitrogen on growth yield and quality of kinnow mandarin in sandy soils of hot arid region[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2014, 9(34): 2638-2647. DOI: 10. 5897/ajar2013. 8110.
- [58] LIN Z H, QI Y P, CHEN R B, et al. Effects of phosphorus supply on the quality of green tea[J]. *Food Chemistry*, 2012, 130 (4): 908-914. DOI: 10. 1016/j. foodchem. 2011. 08. 008.
- [59] KASHYAP P, PRAMANICK K, MEENA K K, et al. Effect of N and K application on yield and quality of pomegranate cv. Ganesh under rainfed conditions[J]. *Indian Journal of Horticulture*, 2012, 69: 322-327.
- [60] ÇOLPAN E, ZENGİN M, ÖZBAHÇE A. The effects of potassium on the yield and fruit quality components of stick tomato [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2013, 54(1): 20-28. DOI: 10. 1007/s13580-013-0080-4.
- [61] ZAHOR R, DONG H, ABID M, et al. Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 137: 73-83. DOI: 10. 1016/j. envexpbot. 2017. 02. 002.
- [62] AMJAD M, AKHTAR J, ANWAR-UI-HAQ M, et al. Soil and foliar application of potassium enhances fruit yield and quality of tomato under salinity[J]. *Turkish Journal of Biology*, 2014, 38 (2): 208-218. DOI: 10. 3906/biy-1305-54.
- [63] ILYAS M. Interactive effect of calcium and magnesium on the growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. *Pure and Applied Biology*, 2016, 5(4): 876-882. DOI: 10. 19045/bspab. 2016. 50110.
- [64] NIAMAT B, NAVEED M, AHMAD Z, et al. Calcium-enriched animal manure alleviates the adverse effects of salt stress on growth, physiology and nutrients homeostasis of *zea mays* L [J]. *Plants*, 2019, 8 (11): 480. DOI: 10. 3390/plants8110480.
- [65] SAJID M. Foliar application of calcium improves growth, yield and quality of tomato cultivars[J]. *Pure and Applied Biology*, 2020, 9 (1): 10-19. DOI: 10. 19045/bspab. 2020. 90002.
- [66] LU Y Q, LIU H P, WANG Y, et al. Synergistic roles of leaf boron and calcium during the growing season in affecting sugar and starch accumulation in ripening apple fruit[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35: 2483-2492. DOI: 10. 1007/s11738-013-1283-0.
- [67] NAGY P, THURZÓ S, SZABÓ Z, et al. Influence of foliar fertilization on mineral composition, sugar and organic acid content of sweet cherry [J]. *Acta Horticulturae*, 2010, 868: 353-358. DOI: 10. 17660/ActaHortic. 2010. 868. 47.
- [68] NGUYEN H H, MANEERONG S, SURANILPONG P. Nutrient uptake and fruit quality of pummelo as influenced by ammonium, potassium, magnesium, zinc application[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 8(1): 100. DOI: 10. 5539/jas. v8n1p100.
- [69] YOUSAF M, BASHIR S, RAZA H, et al. Role of nitrogen and magnesium for growth, yield and nutritional quality of radish[J]. *Saudi J Biol Sci*, 2021, 28 (5): 3021-3030. DOI: 10. 1016/j. sjbs. 2021. 02. 043.
- [70] POURRANJBARI SAGHAIESH S, SOURİ M K, MOGHADDAM M. Effects of different magnesium

- levels on some morphophysiological characteristics and nutrient elements uptake in Khatouni melons (*Cucumis melo* var. *inodorus*) [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 42 (1): 27-39. DOI: 10. 1080/01904167. 2018. 1544256.
- [71] 曾婷婷,付婷婷,黄永川,等.石柱黄连及根际土壤中矿物质元素特征分析[J]. *中国无机分析化学*, 2022, 12(6): 103-111.
- ZENG Tingting, FU Tingting, HUANG Yongchuan, et al. Analysis on character of mineral elements in Shizhu *Coptis Chinensis* Franch. and Rhizospheresoil [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2022, 12(6): 103-111.
- [72] TOLAY I. The impact of different zinc (Zn) levels on growth and nutrient uptake of Basil (*Ocimum basilicum* L.) grown under salinity stress [J]. *PLoS One*, 2021, 16 (2): e0246493. DOI: 10. 1371/journal.pone. 0246493.
- [73] HASNAIN Z, KHAN S, NASRULLAH F, et al. Impact of different levels of zinc and nitrogen on growth, productivity, and quality of aromatic rice cultivated under various irrigation regimes in two districts of Pakistan [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 951565. DOI: 10. 3389/fpls. 2022. 951565.
- [74] AMANULLAH, INAMULLAH. Dry Matter partitioning and harvest index differ in rice genotypes with variable rates of phosphorus and zinc nutrition [J]. *Rice Science*, 2016, 23 (2): 78-87. DOI: 10. 1016/j. rsci. 2015. 09. 006.
- [75] NARWAL R P, DAHIYA R R, MALIK R S, et al. Influence of genetic variability on zinc, iron and manganese responses in wheat [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 121: 45-48. DOI: 10. 1016/j. gexplo. 2012. 06. 006.
- [76] SCHMIDT S B, JENSEN P E, HUSTED S. Manganese deficiency in plants; the impact on photosystem II [J]. *Trends Plant Sci*, 2016, 21(7): 622-632. DOI: 10. 1016/j. tplants. 2016. 03. 001.
- [77] LI M J, ASHRAF U, TIAN H, et al. Manganese-induced regulations in growth, yield formation, quality characters, rice aroma and enzyme involved in 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis in fragrant rice [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2016, 103: 167-75. DOI: 10. 1016/j. plaphy. 2016. 03. 009.
- [78] GADALLAH F M, EL-SAWAH N A, BELAL H E E, et al. Nitrogen-molybdenum-manganese co-fertilization reduces nitrate accumulation and enhances spinach (*Spinacia oleracea* L.) yield and its quality [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2022, 29(4): 2238-2246. DOI: 10. 1016/j. sjbs. 2021. 11. 036.
- [79] HANAOKA H, URAGUCHI S, TAKANO J, et al. OsNIP3; 1, a rice boric acid channel, regulates boron distribution and is essential for growth under boron-deficient conditions [J]. *Plant J*, 2014, 78(5): 890-902. DOI: 10. 1111/tpj. 12511.
- [80] ATIQUE UR R, QAMAR R, HUSSAIN A, et al. Soil applied boron (B) improves growth, yield and fiber quality traits of cotton grown on calcareous saline soil [J]. *PLoS One*, 2020, 15 (8): e0231805. DOI: 10. 1371/journal.pone. 0231805.
- [81] MEKKI B E-D. Effect of boron foliar application on yield and quality of some sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015 (5): 309-316. DOI: 10. 17265/2161-6264/2015. 05. 002.
- [82] DHALI WAL S S, SHARMA V, SHUKLA A K, et al. Assessment of agro-economic indicators of sesame (*Indicum* L.) as influenced by application of boron at different levels and plant growth stages [J]. *Molecules*, 2021, 26(21): 6699. DOI: 10. 3390/molecules26216699.
- [83] NAEEM M, NAEEM M, AHMAD R, et al. Improving drought tolerance in maize by foliar application of boron: water status, antioxidative defense and photosynthetic capacity [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 64: 626-639. DOI: 10. 1080/03650340. 2017. 1370541.
- [84] HAMURCU M, SEKMEN A, TURKAN I, et al. Induced anti-oxidant activity in soybean alleviates oxidative stress under moderate boron toxicity [J]. *Plant Growth Regulation*, 2013, 70: 217-226. DOI: 10. 1007/s10725-013-9793-8.
- [85] SINGH B K, TRIVEDI P. Microbiome and the future for food and nutrient security [J]. *Microb Biotechnol*, 2017, 10(1): 50-53. DOI: 10. 1111/1751-7915. 12592.
- [86] HAFEEZ M B, RAMZAN Y, KHAN S, et al. Application of zinc and iron-based fertilizers improves the growth attributes, productivity, and grain quality of two wheat (*Triticum aestivum*) cultivars [J]. *Front Nutr*, 2021, 8: 779595. DOI: 10. 3389/fnut. 2021. 779595.
- [87] ANWAR Z, BASHARAT Z, HAFEEZ M B, et al. Biofortification of maize with zinc and iron not only enhances crop growth but also improves grain quality [J]. *Asian J Agric Biol*, 2022 (x): 202102079. DOI: 10. 35495/ajab. 2021. 02. 079.