

# Research Progress of 10 Elements Involved in Ginger Growth and Quality Formation

Chunyan Xiong, Yong Zou

College of Forestry and Life Sciences, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing  
Email: nevernever107@126.com

Received: Oct. 15<sup>th</sup>, 2019; accepted: Oct. 30<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 6<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Ginger, as an important medicinal and edible vegetable, has been cultivated in China for a long time in terms of area, yield and export volume. Various elements have been proved to play an important role in the growth and quality of ginger. In this paper, the role of elements in ginger has been studied for many years, in order to provide some references for the research on the variety breeding, quality upgrading and molecular mechanism of element action of ginger.

## Keywords

Elements, Ginger, Growth, Impact

---

# 10种元素参与生姜生长发育与品质形成的研究进展

熊春艳, 邹勇

重庆文理学院园林与生命科学学院, 重庆  
Email: nevernever107@126.com

收稿日期: 2019年10月15日; 录用日期: 2019年10月30日; 发布日期: 2019年11月6日

---

## 摘要

生姜作为一种重要的药食两用型蔬菜,在我国种植面积、产量、出口量长期以来一直保持在世界首位。多种元素已被证实对于植物的生长元素对于生姜的生长发育、品质形成具有极为重要的作用。本文通过对多年来,元素在生姜中的作用研究进行梳理,以期为生姜的品种繁育、品质提档升级、元素作用分子机理研究提供一些参考。

## 关键词

元素, 生姜, 生长, 影响

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

生姜(*Zingiber officinale* Rocs)别名黄姜、姜根、百辣云、勾装指、因地辛[1], 原产中国及东南亚热带地区, 目前其种植面积分布于热带与亚热带区域[2]。生姜喜温不耐寒, 要求土壤的含水量大、需肥量大, 且生长周期长, 生长周期 6~8 个月, 一般霜降前收获[3]。它作为卫生部门第一批公布的药食两用植物资源, 在国内种植面积广泛, 在食品、医学、护肤品等多个行业应用被广泛运用[4], 给国内乃至世界都带来了巨大的经济效益。

2018 年, 中国的生姜种植面积达到 448 万公顷, 比 2017 年增加 16.97%; 2018 年 10 月, 生姜产量 846 万吨, 比 2017 年减少 5.26%, 质量差, 优质产品比例较低[5]。造成生姜产量下降的原因有多种, 如气候、品种、病虫害等, 而根据植物学原理, 植物生长过程中若某种元素缺乏时, 便会影响植物吸收利用其他元素, 对植株有着不同程度的危害, 从而限制产量以及品质的提升[6]。为了提高生姜的产量和品质, 从而拔高生姜的市场竞争力, 本文将以往研究得出的营养元素对生姜生长状况的影响, 为后续生姜的种植提供一些参考。

## 2. 促进叶片生长的元素

### 2.1. 硫(Sulfur)

硫参与植株生长中多项生理历程, 是一些氨基酸、金属辅助因子、辅酶和次级代谢产物的组成元素[7]。在缺硫情况下, 植物诱导表达根中的硫酸盐转运系统, 用于增加硫酸盐的汲取和根-茎转运途径[8]。有研究表明在黑暗下, 不同外源 H<sub>2</sub>S 供体在处理拟南芥时, 对叶绿素和脱镁叶绿酸 a 的降解有较明显抑制作用, 但是却显著提高 SAG12、SAG20 和 SEN4 衰老标志基因的表达, 从而加速叶片的衰老进而加速叶片细胞死亡[9]。硫肥对于农作物有一定的增产效果, 如耿计彪在实验中发现硫肥可显著提高小油菜鲜重[10], 吴萍萍等人在生姜的生长探究中也得出了同样的结论, 其研究还表明氮、硫的合理配有利于改善生姜品质, 同一施氮量下, 增施硫肥可明显提高还原糖、还原型 Vc、姜辣素和姜精油含量, 但施硫处理与不施硫处理各指标之间的差异大多未达 P = 0.05 显著水平。[11]。在同年科研人员对于安丘生姜的研究中还发现生姜增施硫肥可以在一定程度上改善其生育性状、叶色茎秆、后期早衰等状况[12]。

### 2.2. 铁元素(iron)

铁元素是地球上发现最早的作为人体新陈代谢所必需的氧化还原辅助因子微量元素之一[13], 在生长增殖及转化转导等方面具备重要影响[14], 而在植物中, 铁元素参与叶绿素的形成, 一部分由铁螯合转运蛋白 OsYSL9 转运[15], 在植物体内以多种形式与蛋白质结合, 作为催化剂或重要的电子传递体广泛参与生命活动进程。铁缺乏时的反应受转录因子介导的转录网络和泛素连接酶对关键因子的蛋白质水平修饰的调节[16], 如烟草(*N. tabacum*)分泌香豆素和黄素以应对缺铁, 并且 NtPDR3 通过介导 O-甲基化香豆素

分泌至根际[17]。陈新[18]测量出市售生姜中微量铁元素的含量为 18.48  $\mu\text{g/g}$ , 相对于常见的调味料大蒜来说, 含量更为丰富, 人体可将其作为补充铁元素的食补资源[19], 而植株缺铁失绿可导致生长停滞, 严重时可导致死亡。近年来有研究表明铁最佳施肥量为 55.73  $\text{kg}/667\text{m}^2$ , 合理的铁微量元素可以明显改善生姜的生物学性状, 增加生姜的分枝数、株高, 进而提高生姜的经济学和生物学产量[20]。

### 2.3. 氮元素(Nitrogen)

氮是一种常量营养素, 对最佳植物生长和种子产量至关重要[21], 尽管 N 在空气中以高浓度(78%)存在, 但动物和大多数植物不容易获得, 然而, 植物能通过生物固氮作用从土壤中摄取硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )和铵( $\text{NH}_4^+$ )离子, 并将它们转化为氨基酸和蛋白质, 这是所有动物氮元素的极好来源[22]。氮素是构成叶绿素和蛋白质的重要成分, 因此必须要有足量的氮素来满足代谢的要求, 叶片才能进行光合作用[23]。在低氮胁迫下, 小叶杨(*Populus simonii* Carr)的根产生响应, 导致净光合速率, 叶绿素含量和总干重降低[24]。吴萍萍等研究人员指出, 随施氮量的增加, 不同生育期茎和叶的干物质量均随之增加[25]。氮肥对生姜根茎产量及安全品质有明显的影响: 合理施氮能显著提高其蛋白质、维生素 C、糖分和姜精油占比, 有效抑制亚硝酸盐及硝酸盐含量[26]; 但氮肥配施过多, 会导致养分向根茎的分配率减低, 造成产量下降[27]。

## 3. 促进茎秆生长的元素

### 3.1. 硅(Silicon)

硅可以赋予植物对非生物和生物胁迫的抗性[28], 例如在水稻 ASA(有机砷酸阿萨酸)解毒中硅起关键作用[29], 通过调节抗氧化防御和乙二醛酶系统也证明了硅对镉(Cd)胁迫的油菜植物的保护作用[30]。Zhang GQ 等人研究了硅对莱芜大姜品种的影响中表明随着硅水平的增加, 叶  $\text{Mg}^{2+}$ -ATP-Pase 和  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶活性增加, 光合效率(Pn)和水分利用率(WUE)随之增加, 蒸腾速率(Tr)下降[31]。硅元素对生姜植株的株高、茎粗、分枝数和叶片数的增加起很大作用, 因而生姜对硅的需求量较大, 有研究得出生姜增施硅肥, 能显著提高生姜生长势, 增加生姜产量。但过量增施硅肥后, 会导致生姜减产, 一般姜田的硅肥使用量以每 80  $\text{kg}/667\text{m}^2$  上下为宜[32]。而随后便有研究同样证实了硅肥对生姜的重要影响, 施用硅肥提高了生姜的生长活力, 促使植株吸收更多养分, 为产品器官形成奠定了营养基础, 从而为产量的增加创造了物质基础[33]。

### 3.2. 钙(Calcium)

钙是参与各种细胞过程的通用第二信使, 影响植物生长发育和非生物胁迫反应。植物中钙调蛋白(CaM)以及其他植物特异性  $\text{Ca}^{2+}$  传感器(如钙调蛋白样蛋白(CML),  $\text{Ca}^{2+}$  依赖性蛋白激酶(CDPK)和钙调神经磷酸酶 B 样蛋白(CBL))的出现表明植物拥有特定的工具和机器将  $\text{Ca}^{2+}$  信号转换成适当的响应[34]。钙信号传导对包括免疫反应在内的环境反应也至关重要[35], 据徐坤[36] 1993 年的研究得出钙在生姜生长过程中主要分配于枝叶及主枝, 主要流向侧枝及侧枝叶内。据测算, 每生产 1000  $\text{kg}$  鲜姜约吸收钙元素 1.3  $\text{kg}$  [36]。而在的研究中进一步表明了钙在其他作物中也有重要作用, 党现什[37]赵亚飞[38]等人对钙肥对花生的产量及生理特性的影响中指出施钙显著增加主茎高、侧枝长和总分枝数, 为最终产量的提高打下基础。目前对于该元素在生姜中的作用机制及影响研究较少, 今后可能会对相关的机理进行阐明。

## 4. 促进姜球膨大的元素

### 4.1. 磷(Phosphorus)

在低磷情况下, 植物根系形态和植物根构型都会受到胁迫[39]。通常, 土壤和叶面磷补充剂不能提供统计学上显著的产量增加[40]。添加磷肥可以增强蓖麻籽对 Cu 的抗性, 提高植物对污染土壤的 Cu 提取

效率[41], 王馨笙等人研究表明每生产 1000 kg 生姜根茎产品, 吸收  $P_2O_5$  约 1.90 kg, 相对于 N 的吸收约 4.67 kg、 $K_2O$  的吸收约 7.25 kg 来说, 需求量较小, 但同样不可忽视其在生姜中的重要作用。[42]陈奇等人在紫色土条件下配施磷肥, 探究其对生姜产量的影响, 并运用数学模型进行统计分析得出在试验条件下有增产增收效果[43]。虽然磷肥等营养物质可以促进作物生长, 同时提高土壤肥力, 但过量的养分投入会产生弥漫性污染[44], 进而可能降低地表水和地下水的质量[45]。

#### 4.2. 锌元素(Zinc)

锌是植物生长和发育的必需微量营养素[46], 作为  $Zn^{2+}$  离子被植物吸收, 可提高植物的抵抗性, 增加籽粒含量。在 Zn 缺乏时, 催化叶绿素生成的关键酶基因, 包括镁-螯合酶亚基 ChlH 叶绿体, 镁原卟啉 IX 甲基转移酶叶绿体, 在转录组或蛋白质组水平上显示出下调趋势[47], 从而表现为叶片脉间失绿; 而锌含量过高则会迫使植物老化, 使植物体内正常的生理功能受到抑制[48]。相对于施用土壤锌, 叶面施锌对提高潜在缺锌型钙质土壤中小麦籽粒锌含量有较好的效果[49], 且叶面施用 Zn 介导植物对盐度的防御反应, 归因于更好的抗氧化系统和甘氨酸甜菜碱, 脯氨酸, 总游离氨基酸和糖的增加[50]。通过程虎虎等人对安丘市生姜的研究结果表明锌的最佳施肥量  $2.59 \text{ kg}/667\text{m}^2$  [20], 可达到最高亩产量为  $6034.5 \text{ kg}/667\text{m}^2$ , 相比于没有施锌肥的对照组, 有较为明显的增产效果。

#### 4.3. 钾元素(Potassium)

钾是活细胞的必需常量营养素, 是细胞质中最丰富的阳离子, 然而土壤钾素的有效性非常低且可变[51]。钾缺乏的典型症状为萎黄或枯萎坏死, 伴随着光合作用下调和叶水运输受损而伴随发生[52]。在植株生长过程中, 钾的缺乏或过量还会制约对氮的吸收和利用, 配施适当的钾可以促进其根系发育, 提高硝酸还原酶的活性[53]。池培养试验中研究了腐植酸钾对生姜根系生长和活性氧代谢的影响, 结果表明施用腐植酸钾可显著提高根系鲜重和根系活力, 促进根系生长, 延缓姜根的衰老。且根中可溶性蛋白质含量、产量都比对照组呈显著增加[54]。生姜食用植物部分含有基本上高含量的钾[55], 据李富兰[56]等对生姜中钾元素的提取中表明, 实验样品中钾元素的含量为  $4.06 \text{ mg/g}$ 。而据穆洪海等研究结果看钾肥使用量对于生姜地上茎的影响甚微, 但对于生姜的抗病能力和产量来说, 足量的钾肥配施却能起着重要作用, 其作用机制是能促进养分从地上茎秆部分向根部运转, 而根据土壤的肥沃程度, 适当调整钾肥的用量, 能在一定程度上拔高生姜的抗逆性[57]。

#### 4.4. 硒(Selenium)

硒被认为是人类健康的必备微量元素[58], 而植物性硒是人体吸收的重要来源之一, 目前富硒作物已十分常见如富硒精米[59]、富硒大蒜[60]等, 这些高硒食物可能是硒的良好膳食来源[61]。硒的生物利用度取决于其在土壤环境中的形态, 其主要受土壤 pH, 氧化还原电位和土壤有机质含量的影响[62]。而生姜作为日常生活中非常重要的药食兼用的植物, 探究硒对生姜成长情况的影响尤为重要, 在吕臣浩等人研究表明外源施硒可显著提高生姜各部位硒含量, 对生姜的产量也有显著影响。无论是在三叉期还是膨大期, 喷施亚硒酸盐或硒酸盐, 生姜中硒的转化率均可抵达 57%以上, 且在喷硒处理下, 生姜中还原性糖、维生素 C 和姜辣素占比均有进步, 对生姜产品质量有一定程度改善作用[63], 进而拔高生姜的经济效益。

#### 4.5. 硼元素(Boron)

微量营养素硼对于维持植物细胞壁的结构起重要作用, 其作用机制是可以提高细胞壁结合的酚类和木质素含量[64], 是作物物种的高产量的先决条件。硼可以通过扩散或通过主动和便利的运输机制进入植



物[65], 有研究表明 OsNIP3; 1 作为硼酸通道且调节芽组织中的硼的正确分布起作用[66]。硼元素能改善植物生殖器官的生长发育, 在花粉萌生和花粉管生长中具有调理作用[67], 促成碳水化合物的合成及运输, 抑制蛋白质及叶绿素的合成。植株停止生长是硼缺乏最明显的症状[68], 其次是叶硝酸盐含量的剧烈降低, 在这种缺乏条件下, 镁, 钙, 尤其是钾的叶含量也下降[69]。因此, 对于及时合理的对生姜进行补充硼元素尤为重要, 对生姜施于微量硼肥的增产效果较没有施于硼肥之间呈极显著差异, 且对生姜的株高、叶面积、分支数以及姜球膨大等都有明显促进作用[70], 而由近年有研究显示硼的最佳施肥量为 1.98 kg/667m<sup>2</sup>, 可有效增加生姜的亩产量[20]。

## 5. 总结

通过多年来研究者们对于营养元素对生姜的影响可以得出氮肥对生姜根茎产量及品质有明显的影响; 磷肥、锌肥、硅肥均对生姜有增产增收作用; 钾延缓姜根衰老抗病能力和产量; 硫肥对于生姜品质有改善, 且促进生姜植株生长发育, 提高根茎产量; 合理的铁微量元素可以明显改善生姜的生物学性状; 微量硼肥对于生姜有增产效果, 且对株高、叶面积、分支数以及姜球膨大等都有明显促进作用; 外源施硫对生姜品质和产量有一定改善作用。合理的运用营养元素可使其产量和品质有较大的提升效果, 继而增加升生姜的市场竞争力。本文浅谈了常见的营养元素对于生姜生长过程中的影响, 关于更多营养元素对于生姜的影响作用还有待进一步挖掘。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(31701972); 重庆市教委科技基金项目(KJ1711270)。

## 参考文献

- [1] 王国强, 位思清, 李宁阳, 等. 生姜红枣软糖的研制[J]. 食品工业, 2018, 39(12): 26-29.
- [2] 刘波, 缪军, 吴雄. 生姜研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2011(5): 135-138.
- [3] 刘波. 生姜生物学及栽培生理研究进展[J]. 农业科技通讯, 2011(7): 201-203.
- [4] 吴嘉澜, 王笑园, 王坤立, 等. 生姜营养价值及药理作用研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 237-240.
- [5] 刘帅, 陈明均, 贺坦, 等. 2018 年我国生姜市场回顾与 2019 年行情展望[J]. 中国蔬菜, 2019, 360(2): 1-4.
- [6] 田德远, 阳新平. 凤头姜施用中微量元素肥料效果研究[J]. 现代农业科技, 2017(9): 93+99.
- [7] Becana, M., Wienkoop, S. and Matamoros, M.A. (2018) Sulfur Transport and Metabolism in Legume Root Nodules. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1434. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01434>
- [8] Maruyama-Nakashita, A., Watanabe-Takahashi, A., Inoue, E., et al. (2015) Sulfur-Responsive Elements in the 3'-Nontranscribed Intergenic Region Are Essential for the Induction of Sulfate Transporter 2; 1 Gene Expression in Arabidopsis Roots under Sulfur Deficiency. *Plant Cell*, 27, 1279-1296. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.134908>
- [9] 魏波. 硫化物调控拟南芥叶片衰老的机理研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [10] 耿计彪, 张超, 李强, 等. 硫肥对小油菜产量、品质及生理特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(4): 121-125.
- [11] 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 氮、硫配施对生姜产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1): 24-28.
- [12] 罗振明, 谢庆恩, 王瑞芳, 赵凯. 安丘生姜增施硫肥试验初探[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 197-200.
- [13] Romero, A.M., Martínez-Pastor, M., Du, G., et al. (2018) Phosphorylation and Proteasome Recognition of the mRNA-Binding Protein Cth2 Facilitates Yeast Adaptation to Iron Deficiency. *Mbio*, 9, e01694. <https://doi.org/10.1128/mBio.01694-18>
- [14] 徐素萍. 微量元素铁与人体健康的关系[J]. 中国食物与营养, 2007(12): 51-54.
- [15] Senoura, T., Sakashita, E., Kobayashi, T., et al. (2017) The Iron-Chelate Transporter OsYSL9 Plays a Role in Iron Distribution in Developing Rice Grains. *Plant Molecular Biology*, 95, 375-387. <https://doi.org/10.1007/s11103-017-0656-y>
- [16] Kobayashi, T. (2019) Understanding the Complexity of Iron Sensing and Signaling Cascades in Plants. *Plant and Cell*

*Physiology*, **60**, 1440-1446. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcz038>

- [17] Lefèvre, F., Fourmeau, J., Pottier, M., *et al.* (2018) The *Nicotiana tabacum* ABC Transporter NtPDR3 Secretes O-Methylated Coumarins in Response to Iron Deficiency. *Journal of Experimental Botany*, **69**, 4419-4431. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery221>
- [18] 陈新. 离子液体光度法测生姜中微量铁[J]. 南京晓庄学院学报, 2015, 31(6): 51-53.
- [19] 段玲利, 张玉, 李玉梅, 等. 三种植物调味料中铜、铁微量元素的测定[J]. 蔬菜, 2014(6): 9-11.
- [20] 程虎虎, 马桂秀. 锌、硼、铁微量元素肥料在安丘市生姜上的应用效果探析[J]. 中国农业信息, 2017(21): 68-71.
- [21] Zhang, Z.H., Zhou, T., Liao, Q., *et al.* (2018) Integrated Physiologic, Genomic and Transcriptomic Strategies Involving the Adaptation of Allotetraploid Rapeseed to Nitrogen Limitation. *BMC Plant Biology*, **18**, 322. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1507-y>
- [22] Cukier, C., Lea, P.J., Cañas, R., Marmagne, A., *et al.* (2018) Labeling Maize (*Zea mays* L.) Leaves with  $^{15}\text{NH}_4^+$  and Monitoring Nitrogen Incorporation into Amino Acids by GC/MS Analysis. *Current Protocols in Plant Biology*, **3**, e20073. <https://doi.org/10.1002/cppb.20073>
- [23] 郭衍银, 王秀锋, 徐坤, 等. 根结线虫对生姜大量元素吸收特性的影响[J]. 西北农业学报, 2003, 12(4): 93-97.
- [24] Zhang, C., Meng, S., Li, M. and Zhao, Z. (2018) Transcriptomic Insight into Nitrogen Uptake and Metabolism of *Populus simonii* in Response to Drought and Low Nitrogen Stresses. *Tree Physiology*, **38**, 1672-1684. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy085>
- [25] 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 氮硫配施对生姜生长和氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 251-258.
- [26] 李录久, 刘荣乐, 陈防, 等. 不同氮水平对生姜产量和品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 382-388.
- [27] 徐坤. 氮肥对生姜生长及产量的影响[J]. 中国蔬菜, 1999(6): 17-19.
- [28] Zhan, L.P., Peng, D.L., Wang, X.L., *et al.* (2018) Priming Effect of Root-Applied Silicon on the Enhancement of Induced Resistance to the Root-Knot Nematode *Meloidogyne Graminicola* in Rice. *BMC Plant Biology*, **18**, 50. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1266-9>
- [29] Geng, A., Wang, X., Wu, L., *et al.* (2018) Silicon Improves Growth and Alleviates Oxidative Stress in Rice Seedlings (*Oryza sativa* L.) by Strengthening Antioxidant Defense and Enhancing Protein Metabolism under Arsanilic Acid Exposure. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **158**, 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.050>
- [30] Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T.I., *et al.* (2017) Exogenous Silicon Attenuates Cadmium-Induced Oxidative Stress in *Brassica napus* L. by Modulating AsA-GSH Pathway and Glyoxalase System. *Frontiers in Plant Science*, **8**, 1061. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01061>
- [31] Zhang, G.Q., Xu, K., Wang, X.C., *et al.* (2008) Effects of Silicon on Exchange Characteristics of  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  in Ginger Leaves. *The Journal of Applied Ecology*, **19**, 1702-1707.
- [32] 姚红燕, 苏中晓, 李爱科, 等. 增施硅肥对生姜的影响研究[J]. 农业与技术, 2015, 35(4): 101.
- [33] 朱瑞华, 蒲海涛, 魏艳杰, 等. 硅肥对平度生姜植株生长及产量的影响[J]. 中国农技推广, 2016, 32(11): 52-54.
- [34] Kaats, G.R., Preuss, H.G., Stohs, S., *et al.* (2016) A 7-Year Longitudinal Trial of the Safety and Efficacy of a Vitamin/Mineral Enhanced Plant-Sourced Calcium Supplement. *The Journal of the American College of Nutrition*, **35**, 91-99. <https://doi.org/10.1080/07315724.2015.1090357>
- [35] Yang, D.L., Shi, Z., Bao, Y., *et al.* (2017) Calcium Pumps and Interacting BON1 Protein Modulate Calcium Signature, Stomatal Closure, and Plant Immunity. *Plant Physiology*, **175**, 424-437. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00495>
- [36] 徐坤, 康立美, 赵德婉. 生姜对钙镁硼锌吸收分配规律的研究[J]. 山东农业科学, 1993(5): 21-23.
- [37] 党现什, 蒋春姬, 李憬霖, 等. 钙肥对花生产量及生理特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(6): 717-723
- [38] 赵亚飞, 张彩军, 孟谣, 等. 不同施钙量对花生荚果发育时期农艺性状的影响[J]. 花生学报, 2019, 48(1): 27-33+57.
- [39] 许仙菊, 张永春. 植物耐低磷胁迫的根系适应性机制研究进展[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1425-1429.
- [40] Oke, M., Ahn, T., Schofield, A. and Paliyath, G. (2005) Effects of Phosphorus Fertilizer Supplementation on Processing Quality and Functional Food Ingredients in Tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **53**, 1531-1538. <https://doi.org/10.1021/jf0402476>
- [41] Huang, G., Rizwan, M.S., Ren, C., *et al.* (2018) Influence of Phosphorous Fertilization on Copper Phytoextraction and Antioxidant Defenses in Castor Bean (*Ricinus communis* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 115-123. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8132-9>

- [42] 王馨笙, 徐坤, 杨天慧. 生姜对氮、磷、钾吸收分配规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1515-1520.
- [43] 陈奇, 杨玉梅, 刘建平, 等. 生姜“3414”肥效试验[J]. 现代农业科技, 2013(1): 75-76.
- [44] Huang, H., Ouyang, W., Wu, H., *et al.* (2017) Long-Term Diffuse Phosphorus Pollution Dynamics under the Combined Influence of Land Use and Soil Property Variations. *Science of the Total Environment*, **579**, 1894-1903. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.198>
- [45] Jalali, M. and Jalali, M. (2017) Assessment Risk of Phosphorus Leaching from Calcareous Soils Using Soil Test Phosphorus. *Chemosphere*, **171**, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.042>
- [46] Khatun, M.A., Hossain, M.M., Bari, M.A., *et al.* (2018) Zinc Deficiency Tolerance in Maize Is Associated with the Up-Regulation of Zn Transporter Genes and Antioxidant Activities. *Plant Biology*, **20**, 765-770. <https://doi.org/10.1111/plb.12837>
- [47] Zhang, J., Wang, S., Song, S., *et al.* (2019) Transcriptomic and Proteomic Analyses Reveal New Insight into Chlorophyll Synthesis and Chloroplast Structure of Maize Leaves under Zinc Deficiency Stress. *Journal of Proteomics*, **199**, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2019.03.001>
- [48] 张莹. 锌污染对土壤和植物的影响[J]. 度假旅游, 2018(8): 86-87.
- [49] Zhao, A.Q., Tian, X.H., Cao, Y.X., *et al.* (2014) Comparison of Soil and Foliar Zinc Application for Enhancing Grain Zinc Content of Wheat Grown on Potentially Zinc-Deficient Calcareous Soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **94**, 2016-2022. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6518>
- [50] Iqbal, M.N., Rasheed, R., Ashraf, M.Y., *et al.* (2018) Exogenously Applied Zinc and Copper Mitigate Salinity Effect in Maize (*Zea mays* L.) by Improving Key Physiological and Biochemical Attributes. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 23883-23896. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2383-6>
- [51] Wang, X., Hao, L., Zhu, B. and Jiang, Z. (2018) Plant Calcium Signaling in Response to Potassium Deficiency. *International Journal of Molecular Sciences*, **19**, 3456. <https://doi.org/10.3390/ijms19113456>
- [52] Lu, Z., Xie, K., Pan, Y., *et al.* (2019) Potassium Mediates Coordination of Leaf Photosynthesis and Hydraulic Conductance by Modifications of Leaf Anatomy. *Plant, Cell & Environment*, **42**, 2231-2244. <https://doi.org/10.1111/pce.13553>
- [53] Tian, G., Wang, F., Peng, L., *et al.* (2017) Effects of Different Potassium Levels on Growth and NO<sub>3</sub>-Uptake and Utilization of *Malus hupehensis* Seedlings. *The Journal of Applied Ecology*, **28**, 2254-2260.
- [54] Liang, T.B., Wang, Z.L., Wang, R.J., *et al.* (2007) Effects of Potassium Humate on Ginger Root Growth and Its Active Oxygen Metabolism. *The Journal of Applied Ecology*, **18**, 813-817.
- [55] Rachkeeree, A., Kantadoung, K., Suksathan, R., *et al.* (2018) Nutritional Compositions and Phytochemical Properties of the Edible Flowers from Selected Zingiberaceae Found in Thailand. *Frontiers in Nutrition*, **5**, 3. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00003>
- [56] 李富兰, 斯维, 周雪松, 等. 生姜中钾的提取工艺研究[J]. 中国调味品, 2017, 42(3): 91-93.
- [57] 穆洪海, 臧丽青, 于继娥, 等. 五莲县山区生姜钾素梯度试验研究[J]. 中国果菜, 2012(3): 26-27.
- [58] Volkotrub, L.P. and Andropova, T.V. (2004) Role of Selenium in the Etiology and Prevention of Diseases (Review). *Gigiena i Sanitariia*, **3**, 57-61.
- [59] Chen, L., Yang, F., Xu, J., *et al.* (2002) Determination of Selenium Concentration of Rice in China and Effect of Fertilization of Selenite and Selenate on Selenium Content of Rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **50**, 5128-5130. <https://doi.org/10.1021/jf0201374>
- [60] Ip, C. and Lisk, D.J. (2004) Bioavailability of Selenium from Selenium-Enriched Garlic. *Nutrition and Cancer*, **20**, 129-137. <https://doi.org/10.1080/01635589309514279>
- [61] Yan, L. and Johnson, L.K. (2011) Selenium Bioavailability from Naturally Produced High-Selenium Peas and Oats in Selenium-Deficient Rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **59**, 6305-6311. <https://doi.org/10.1021/jf201053s>
- [62] Wadgaonkar, S.L., Nancharaiyah, Y.V., Esposito, G., *et al.* (2018) Environmental Impact and Bioremediation of Seleniferous Soils and Sediments. *Critical Reviews in Biotechnology*, **38**, 941-956. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1420623>
- [63] 吕臣浩, 邓小芳, 陈友恩, 等. 生姜硒营养特性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 279(1): 117-121.
- [64] Hajiboland, R., Bahrami-Rad, S. and Bastani, S. (2013) Phenolics Metabolism in Boron-Deficient Tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] Plants. *Acta Biologica Hungarica*, **64**, 196-206. <https://doi.org/10.1556/ABiol.64.2013.2.6>
- [65] Chatterjee, M., Liu, Q., Menello, C., *et al.* (2017) The Combined Action of Duplicated Boron Transporters Is Required for Maize Growth in Boron-Deficient Conditions. *Genetics*, **206**, 2041-2051.

- <https://doi.org/10.1534/genetics.116.198275>
- [66] Hanaoka, H., Uraguchi, S., Takano, J., *et al.* (2014) OsNIP3;1, a Rice Boric Acid Channel, Regulates Boron Distribution and Is Essential for Growth under Boron-Deficient Conditions. *The Plant Journal*, **78**, 890-902. <https://doi.org/10.1111/tpj.12511>
- [67] Wang, Q., Lu, L., Wu, X., *et al.* (2004) Boron Influences Pollen Germination and Pollen Tube Growth in *Picea meyeri*. *Tree Physiology*, **23**, 345-351. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.5.345>
- [68] Lukaszewski, K.M. and Blevins, D.G. (1996) Root Growth Inhibition in Boron-Deficient or Aluminum-Stressed Squash May Be a Result of Impaired Ascorbate Metabolism. *Plant Physiology*, **112**, 1135-1140. <https://doi.org/10.1104/pp.112.3.1135>
- [69] Camacho-Cristobal, J.J. and Gonzalez-Fontes, A. (1999) Boron Deficiency Causes a Drastic Decrease in Nitrate Content and Nitrate Reductase Activity, and Increases the Content of Carbohydrates in Leaves from Tobacco Plants. *Planta*, **209**, 528-536. <https://doi.org/10.1007/s004250050757>
- [70] 张乃国, 杨贵华, 李春梅, 等. 硼、锌对莱芜大姜生长发育及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2006(1): 44-45.