

分类号: S37
密 级: 公 开

单位代码: 10363
学 号: 2210510103

微波处理对玉米萌发、营养和活性成分的影响

**EFFECTS OF MICROWAVE TREATMENT ON
MAIZE GERMINATION, NUTRIENTS AND ACTIVE
COMPONENTS**

学生姓名: _____ 陆新月 _____

指导教师: _____ 王顺民 教授 _____

专 业: _____ 食品科学与工程 _____

研究方向: _____ 农产品加工与贮藏 _____

论文答辩日期: 2024 年 5 月 30 日

原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：陆新月

日期：2024年5月31日

版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

陆新月

日期：2024 年 5 月 31 日

指导教师签名：

石鹏

日期：2024 年 5 月 31 日

微波处理对玉米萌发、营养和活性成分的影响

摘 要

微波作为一种高效且环保的物理技术，已经广泛应用于食品、化工、医药等行业。近年来，很多报道称微波处理种子后可激活其体内的多种酶，提高种子的萌发速率，提高芽苗的营养品质，促进生物活性成分的合成进而提高抗氧化能力。玉蜀黍（*Zea mays* L.），俗称玉米，是重要的粮食产物。玉米的营养成分丰富，富含蛋白质、脂肪、维生素、类胡萝卜素和多种微量元素，近年来已经被科研人员用作开发高营养价值的功能性食品的原材料。

本研究测定了 5 种玉米的萌发特性和叶黄素含量，并优选出一种性能均佳的玉米品种（郑单 958，ZD）进行研究。研究了微波处理对玉米种子微观结构、萌发特性和芽苗生长以及发芽玉米的主要营养成分、活性成分和抗氧化能力的影响，以期开发高营养发芽玉米类功能性食品提供理论基础。主要研究结果如下：

1、研究微波处理对玉米种子萌发特性的影响。结果表明，微波处理能显著提高玉米的萌发特性，在 200 W/20 s 的微波处理下，玉米种子的发芽势、发芽率、发芽指数和 AGT 分别是 88.67%、99.33%、36.39 和 1.83 d，表明微波处理只在特定的功率和时间范围内能有效促进种子发芽。微波处理能显著提高玉米萌发后的芽长和可食部分鲜重，在 200 W/20 s 的微波处

理下第 10 d 的芽长和可食部分鲜重分别达到了 18.63 cm 和 1.79 g。在 200 W 的功率下微波处理 20 s 后, 7 d 的发芽玉米的呼吸速率最高 (3.53 mg CO₂/g FW/h), 比 CK 提高了 41.50%, 是种子的 3.65 倍。SEM 图分析表明, 微波处理能够改变玉米种子的原始结构, 蛋白质基质与淀粉之间的结合开始松动, 胚乳淀粉颗粒的形状变得不规则、表面有明显凹陷和粘连。

2、研究微波处理对发芽玉米主要营养成分的影响。微波处理能显著提高发芽玉米中的水分含量, 200 W/20 s 的微波处理后发芽 10 d 的玉米中水分含量最高 (83.70%), 较 CK 提高 7.60%。微波处理能显著提高发芽玉米中淀粉的水解, 在 200 W 的微波功率下处理 20 s 后, 发芽 10 d 的玉米淀粉酶活性和还原糖含量分别为 2.68 U 和 17.73 g/100 g DW, 分别比 CK 提高了 13.56%和 6.04%, 10 d 的发芽玉米中淀粉含量仅为 21.45 g/100 g DW, 比种子减少了 68.44%。微波处理可以提高发芽玉米中的游离氨基酸含量, 且在 200 W 的功率下微波处理 20 s 后, 7 d 的发芽玉米中游离氨基酸含量最高, 为 32.09 mg/100 g DW, 比 CK 提高了 19.52%。微波处理能显著提高发芽玉米中可溶性蛋白的含量, 加速脂肪分解成小分子物质, 但处理组之间的可溶性蛋白和脂肪含量的差异并不显著 ($P \geq 0.05$)。

3、研究微波处理对发芽玉米活性成分的影响。微波处理能显著提高发芽玉米中的 MDA 含量, 使得发芽玉米迅速在体内合成大量活性物质清除因逆境胁迫产生过量的自由基, 且在 200 W/20 s 的微波处理下, 第 10 d 的 MDA 含量最低 (1.23 nmol/g FW), 比 CK 高 9.82%。微波处理能够提高发芽玉米中脯氨酸、总酚、VC 和类胡萝卜素的含量。在 200 W/20 s 的

微波处理下，发芽 10 d 的玉米中脯氨酸和类胡萝卜素含量最高，分别为 70.72 $\mu\text{g/g DW}$ 和 184.99 $\mu\text{g/g DW}$ ，分别比 CK 增加了 15.48%和 14.16%。而 250 W/20 s 微波处理后发芽 4 d 的玉米中总酚含量达到峰值，为 4.27 mg/g DW，比 CK 增加了 46.05%。在 200 W/30 s 的处理下，10 d 的发芽玉米的 VC 含量最高，为 46.04 mg/100 g DW，比 CK 增加 15.52%，是种子的 103.23 倍。微波处理能显著提高发芽玉米不同部位的叶黄素含量，在 200 W/20 s 的微波处理下，10 d 的发芽玉米的籽粒和芽苗的含量分别为 43.02 $\mu\text{g/g DW}$ 和 917.06 $\mu\text{g/g DW}$ ，分别比 CK 提高了 6.14%和 11.53%。FTIR 分析表明，微波处理能提高发芽玉米中类胡萝卜素特征峰的吸收强度，发芽和适度的微波处理均能提高玉米中类胡萝卜素的含量。

4、研究微波处理对发芽玉米抗氧化能力的影响。适度的微波处理能最大限度的提高发芽玉米的抗氧化能力和抗氧化酶活性。微波功率 200 W 下处理 20 s 后，10 d 的发芽玉米清除 DPPH 自由基的能力和 FRAP 最大，为 21.62 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 和 18.12 $\mu\text{mol TE/g DW}$ ，分别比 CK 提高了 28.81%和 58.57%；200 W/20 s 的微波处理能让 7 d 的发芽玉米清除 ABTS 自由基的能力最强（129.75 $\mu\text{mol TE/g DW}$ ），比 CK 提高 37.67%。200 W/20 s 微波处理后，10 d 的发芽玉米 SOD 和 POD 活性均达到最高，分别比 CK 提高了 8.46%和 56.27%；7 d 的发芽玉米 CAT 活性达到 1109.06 U，比 CK 提高了 20.87%。

关键词：微波，玉米，萌发，营养成分，活性成分

EFFECTS OF MICROWAVE TREATMENT ON MAIZE GERMINATION, NUTRIENTS AND ACTIVE COMPONENTS

ABSTRACT

Microwave, as an efficient and environmentally friendly physical technology, has been widely used in industries such as food, chemical, and pharmaceutical. In recent years, many reports have shown that microwave treatment can activate various enzymes in seeds, improve the germination rate of seeds, enhance the nutritional quality of seedlings, promote the synthesis of bioactive components, and thus enhance antioxidant capacity.

Maize (*Zea mays* L.) is a significant foodgrain. And maize is rich in protein, fat, vitamins, cellulose, carotenoids, and various trace elements, which have great potential for developing high nutrient and high biological functional foods.

This study measured the germination characteristics and lutein content of five types of maize, and selected a maize variety (Zhengdan 958, ZD) with excellent performance for research. This study investigated the effects of microwave treatment on the microstructure and germination characteristics of seeds, and nutrients, active components, and antioxidant capacity of germinated maize, in order to provide a theoretical basis for the development of functional foods for high nutritional germinated maize. The primary research findings are as follows:

1. The effects of the germination characteristics of maize seeds after microwave treatment were studied. The results showed that moderate

microwave treatment significantly improve the germination characteristics of maize seeds. Under the microwave treatment of 200 W/20 s, the germination potential, germination rate, germination index, and average germination time of maize seeds were 88.67%, 99.33%, 36.39, and 1.83 d, respectively. Analysis showed that microwave treatment can only effectively promote seed germination within a specific power and time range. Microwave treatment increased the sprout length and edible fresh weight of maize after germination, with the microwave treatment of 200 W/20 s, the sprout length and edible fresh weight reached 18.63 cm and 1.79 g at 10 d, respectively. After 20 s of microwave treatment at 200 W, the respiration rate of germinated maize at 7 d was the highest (3.53 mg CO₂/g FW/h), which was 41.50% higher than that of CK and 3.65 times higher than that of seeds. The analysis of scanning electron microscopy showed that microwave treatment can change the original structure of maize seeds, the binding between the protein matrix and starch began to loosen, the shape of endosperm starch granules became irregular, with obvious surface depressions and adhesion between starch granules.

2. The effects of the main nutritional components of germinated maize after microwave treatment were studied. Microwave treatment could significantly increase the moisture content in germinated maize. Under the microwave treatment of 200 W/20 s, the moisture content in germinated maize at 10 d is the highest (83.70%), which is 7.60% higher than that in CK. Microwave treatment could significantly improve the hydrolysis of starch in germinated maize. After 20 s of treatment at 200 W, the amylase activity and reducing sugar content of germinated maize at 10 d were 2.68 U and 17.73 g/100 g, respectively, which were 13.56% and 6.04% higher than those of CK. The starch content in germinated maize at 10 d was only 21.45 g/100 g, which was 68.44% lower than that of seeds. Microwave treatment could increase the

content of free amino acids in germinated maize, and with the microwave treatment of 200 W/20 s, the highest content of free amino acids was found in germinated maize at 7 d, which was 32.09 mg/100 g, an increase of 19.52% compared to CK. Microwave treatment could significantly increase the content of soluble protein in germinated maize and accelerate the decomposition of fat into small molecule substances, but the difference in soluble protein and fat content between the treatment groups were not significant ($p \geq 0.05$).

3. The effects of the active components of germinated maize after microwave treatment were studied. Microwave treatment could significantly increase the content of malondialdehyde (MDA) in germinated maize, enable it to quickly synthesize a large amount of active substances to eliminate excessive free radicals caused by stress. Moreover, under the microwave treatment of 200 W/20 s, the MDA content at 10 d was the lowest (1.23 nmol/g FW), which was 9.82% higher than CK. Moderate microwave treatment could increase the content of proline, total phenols, and carotenoids in germinated maize. With the microwave treatment of 200 W/20 s, the content of proline and carotenoids were highest in germinated maize at 10 d, reaching 70.72 $\mu\text{g/g}$ and 184.99 $\mu\text{g/g}$, increased by 15.48% and 14.16% compared to CK, respectively. Under the microwave treatment of 250 W/20 s, the total phenolic content in germinated maize at 4 d reached its peak at 4.27 mg/g, an increase of 46.05% compared to CK. Microwave treatment could significantly increase the lutein content in different parts of germinated maize. With the microwave treatment of 200 W/20 s, the content of kernels and sprouts in germinated maize at 10 d were 43.02 $\mu\text{g/g}$ and 917.06 $\mu\text{g/g}$, increased by 6.14% and 11.53% compared to the CK group, respectively. Fourier transform infrared spectroscopy analysis showed that microwave treatment can enhance the absorption intensity of characteristic peaks of carotenoids in germinated maize,

both germination and appropriate microwave treatment can increase the content of carotenoids in maize.

4. The effects of the antioxidant capacities of germinated maize after microwave treatment were studied. Moderate microwave treatment could maximize the antioxidant capacity and antioxidant enzyme activity of germinated maize. Under the microwave treatment of 200 W/20 s, the ability of germinated maize to scavenge DPPH free radicals and the total reducing power at 10 d were the highest, which were 21.62 $\mu\text{mol TE/g}$ and 18.12 $\mu\text{mol TE/g}$, increased by 28.81% and 58.57%, respectively. And the ABTS free radical scavenging ability of germinated maize at 7 d was strongest (129.75 $\mu\text{mol TE/g}$), increased by 37.67% compared to CK. With the microwave treatment of 200 W/20 s, both superoxide dismutase and peroxidase activities of germinated maize at 10 d reached their highest levels, which increased by 8.46% and 56.27%, respectively. And catalase activity of germinated maize was 1109.06 U at 7 d, increased by 20.87% compared with CK.

KEY WORDS: microwave, maize, germination, nutrients, active components

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	IV
缩略词表	vi
第 1 章 文献综述	- 1 -
1.1 引言	- 1 -
1.1.1 玉米简介	- 1 -
1.1.2 玉米种子的结构	- 1 -
1.2 非生物逆境胁迫对玉米萌发的影响	- 2 -
1.2.1 盐胁迫	- 2 -
1.2.2 干旱	- 3 -
1.2.3 高温和低温	- 3 -
1.2.4 重金属	- 3 -
1.3 不同处理对玉米中主要营养成分的影响	- 4 -
1.3.1 淀粉和糖类	- 4 -
1.3.2 蛋白质和氨基酸	- 5 -
1.3.3 脂肪和脂肪酸	- 6 -
1.4 不同处理对玉米中活性成分富集的影响	- 6 -
1.4.1 酚类物质	- 6 -
1.4.2 维生素	- 7 -
1.4.3 类胡萝卜素	- 7 -
1.5 研究内容及目的意义	- 8 -
1.5.1 研究内容和方法	- 8 -
1.5.2 研究目的及意义	- 8 -
第 2 章 微波处理对玉米萌发中生理指标的影响	- 10 -
2.1 引言	- 10 -
2.2 材料与设备	- 10 -

2.2.1 实验材料	- 10 -
2.2.2 实验试剂	- 11 -
2.2.3 实验仪器	- 11 -
2.3 实验方法	- 11 -
2.3.1 玉米发芽试验	- 11 -
2.3.2 发芽玉米样品的制备	- 12 -
2.3.3 发芽率和发芽势的测定	- 12 -
2.3.4 发芽指数的测定	- 12 -
2.3.5 AGT 的测定	- 12 -
2.3.6 芽长和可食部分鲜重的测定	- 12 -
2.3.7 叶黄素含量的测定	- 13 -
2.3.8 呼吸速率的测定	- 13 -
2.3.9 玉米种子微观结构的测定	- 13 -
2.4 数据统计与分析	- 14 -
2.5 结果与分析	- 14 -
2.5.1 不同玉米的萌发特性	- 14 -
2.5.2 不同玉米的叶黄素含量	- 14 -
2.5.3 微波处理对玉米萌发特性的影响	- 15 -
2.5.4 微波处理对玉米芽长的影响	- 16 -
2.5.5 微波处理对发芽玉米可食部分鲜重的影响	- 17 -
2.5.6 微波处理对玉米呼吸速率的影响	- 18 -
2.5.7 微波处理对玉米种子微观结构的影响	- 18 -
2.6 本章小结	- 19 -
第 3 章 微波处理对发芽玉米中主要营养成分的影响	- 21 -
3.1 引言	- 21 -
3.2 材料与设备	- 21 -
3.2.1 实验材料	- 21 -

3.2.2 实验试剂	- 22 -
3.2.3 实验仪器	- 22 -
3.3 实验方法	- 22 -
3.3.1 玉米发芽试验	- 22 -
3.3.2 发芽玉米样品的制备	- 22 -
3.3.3 水分含量的测定	- 23 -
3.3.4 淀粉和还原糖含量的测定	- 23 -
3.3.5 淀粉酶活性的测定	- 23 -
3.3.6 可溶性蛋白含量的测定	- 23 -
3.3.7 游离氨基酸含量的测定	- 23 -
3.3.8 粗脂肪含量的测定	- 24 -
3.4 数据统计与分析	- 24 -
3.5 结果与分析	- 24 -
3.5.1 微波处理对发芽玉米水分含量的影响	- 24 -
3.5.2 微波处理对发芽玉米淀粉含量的影响	- 25 -
3.5.3 微波处理对发芽玉米还原糖含量的影响	- 25 -
3.5.4 微波处理对发芽玉米淀粉酶活性的影响	- 26 -
3.5.5 微波处理对发芽玉米可溶性蛋白含量的影响	- 27 -
3.5.6 微波处理对发芽玉米游离氨基酸含量的影响	- 28 -
3.5.7 微波处理对发芽玉米粗脂肪含量的影响	- 29 -
3.6 本章小结	- 29 -
第 4 章 微波处理对发芽玉米中活性成分富集的影响	- 31 -
4.1 引言	- 31 -
4.2 材料与设备	- 31 -
4.2.1 实验材料	- 31 -
4.2.2 实验试剂	- 32 -
4.2.3 实验仪器	- 32 -

4.3 实验方法	- 32 -
4.3.1 玉米发芽试验	- 32 -
4.3.2 发芽玉米样品的制备	- 32 -
4.3.3 MDA 含量的测定	- 32 -
4.3.4 脯氨酸含量的测定	- 33 -
4.3.5 总酚含量的测定	- 33 -
4.3.6 VC 含量的测定	- 33 -
4.3.7 叶黄素含量的测定	- 34 -
4.3.8 总类胡萝卜素含量的测定	- 34 -
4.3.9 FTIR 的测定	- 34 -
4.4 数据统计与分析	- 34 -
4.5 结果与分析	- 35 -
4.5.1 微波处理对发芽玉米 MDA 含量的影响	- 35 -
4.5.2 微波处理对发芽玉米中脯氨酸含量的影响	- 35 -
4.5.3 微波处理对发芽玉米总酚含量的影响	- 36 -
4.5.4 微波处理对发芽 VC 含量的影响	- 37 -
4.5.5 微波处理对发芽玉米不同部位叶黄素含量的影响	- 38 -
4.5.6 微波处理对发芽玉米类胡萝卜素含量的影响	- 39 -
4.5.7 微波处理对发芽玉米 FTIR 的影响	- 40 -
4.6 本章小结	- 40 -
第 5 章 微波处理对发芽玉米抗氧化能力的影响	- 43 -
5.1 引言	- 43 -
5.2 材料与设备	- 43 -
5.2.1 实验材料	- 43 -
5.2.2 实验试剂	- 43 -
5.2.3 实验仪器	- 44 -
5.3 实验方法	- 44 -

5.3.1 玉米发芽试验	- 44 -
5.3.2 发芽玉米样品的制备	- 44 -
5.3.3 DPPH 自由基清除能力的测定	- 44 -
5.3.4 ABTS 自由基清除能力的测定	- 44 -
5.3.5 FRAP 的测定	- 45 -
5.3.6 SOD 活性测定	- 45 -
5.3.7 POD 活性测定	- 46 -
5.3.8 CAT 活性测定	- 46 -
5.4 数据统计与分析	- 47 -
5.5 结果与分析	- 47 -
5.5.1 微波处理对发芽玉米 DPPH 自由基清除能力的影响	- 47 -
5.5.2 微波处理对发芽玉米 ABTS 自由基清除能力的影响	- 48 -
5.5.3 微波处理对发芽玉米 FRAP 的影响	- 48 -
5.5.4 微波处理对 SOD 活性的影响	- 49 -
5.5.5 微波处理对 POD 活性的影响	- 50 -
5.5.6 微波处理 CAT 活性的影响	- 50 -
5.6 本章小结	- 51 -
第 6 章 结论与展望	- 53 -
6.1 结论	- 53 -
6.2 展望	- 54 -
参考文献	- 56 -
攻读硕士学位期间取得的成果	- 63 -

缩略词表

英文缩写	英文全称	中文
VC	Vitamin C	维生素C
AGT	Average germination time	平均发芽时间
SEM	Scanning electron microscope	扫描电子显微镜
MDA	Malondialdehyde	丙二醛
FTIR	Fourier Transform infrared spectroscopy	傅里叶变换红外光谱
SOD	Superoxide dismutase	超氧化物歧化酶
POD	Peroxidase	过氧化物酶
CAT	Catalase	过氧化氢酶
DPPH	1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl	1,1-二苯基-2-三硝基苯肼
ABTS	2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)	2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸
FRAP	Ferric reducing ability of plasma	总还原力
ROS	Reactive oxygen species	活性氧
VE	Vitamin E	维生素E
VB ₁	Vitamin VB ₁	维生素B ₁
VB ₂	Vitamin VB ₂	维生素B ₂
VA	Vitamin A	维生素A
GABA	γ -aminobutyric acid	γ -氨基丁酸
MeJA	Methyl jasmonate	茉莉酸甲酯
PCR	Polymerase Chain Reaction	聚合酶链式反应
TCA	Trichloroacetic acid	三氯乙酸
TBA	Thiobarbituric acid	硫代巴比妥酸
DCPIP	2,6-Dichloroindophenol	2,6-二氯靛酚
TPTZ	2,4,6-tripyridin-2-yl-1,3,5-triazine	2,4,6-三吡啶基三嗪
PSY	Phytoene synthase	八氢番茄红素合成酶
ϵ -LCY	Lycopene ϵ -cyclase	番茄红素 ϵ -环化酶
β -OHase	β -carotene hydroxylase	胡萝卜素 β 环羟化酶

第 1 章 文献综述

1.1 引言

1.1.1 玉米简介

玉蜀黍 (*Zea mays* L.), 俗称玉米, 是禾本科玉蜀黍属一年生草本植物^[1]。在所有的主食中, 玉米的营养价值是最高的。玉米籽粒中淀粉含量为 70%左右^[2], 是主要的供能成分。玉米中蛋白质含量也相当丰富, 为 6.6%~13.5%^[3]。玉米中含有多种人体必需的氨基酸, 根据徐鑫等^[4]研究发现, 玉米中含有 16 种氨基酸, 总量为 65.32~79.50 g/100 g, 人体必需氨基酸含量超过 24 %。玉米不仅含有大量的营养成分, 还富含维生素^[5]、酚类化合物^[6]和类胡萝卜素^[7]等活性成分。玉米中的这些营养物质和活性成分使它具有抗氧化^[6]、抗肿瘤^[8, 9]、抗炎^[10]和保护视力^[11, 12]等生物学功能, 能够满足一些特定人群的营养需要, 近年来已经成为开发功能性食品的研究焦点^[13]。

1.1.2 玉米种子的结构

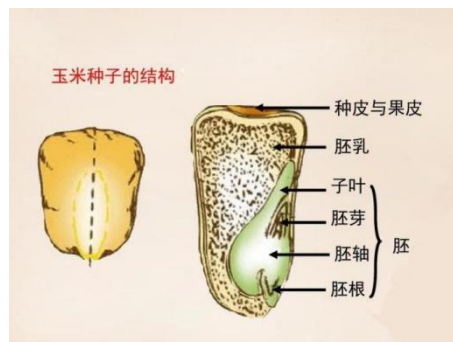


图 1-1 玉米种子的结构

Fig.1-1 Structure of maize seeds

玉米种子呈黄色, 它的形状为卵形、U 形, 扁平状, 看起来十分有光泽, 表面光滑, 并且十分饱满, 大小基本一致, 千粒重约 300 g 以上。不同种类的玉米种子大小、形状各有些许差别。由图 1-1^[14]可知, 玉米是由种皮、胚乳和胚组成的^[15]。种皮主要起到保护种子内部和防虫害的作用, 约占整颗种子质量的 6%~8%。胚乳中含有淀粉、蛋白质和脂肪等营养物质, 为种子萌发提供能量, 占粒重部分的 73%~85%。胚主要由

子叶、胚芽、胚轴和胚根组成，约占玉米籽粒质量的 10%~15%。萌发时，胚根率先突破种皮，充分吸收水分后加速胚芽的生长，子叶和胚轴逐渐生长为玉米的茎和侧根。

1.2 非生物逆境胁迫对玉米萌发的影响

对植物生存生长不利的各种环境因素叫逆境，亦称胁迫。逆境会使植物细胞产生脱水现象，导致生物膜系统受损、体内合成代谢酶活性下降，最终让植物细胞代谢紊乱。有些植物在面对逆境胁迫时，自身会大量合成可溶性糖、可溶性蛋白等可以调节渗透压的物质来抵御外界的伤害。植物生长发育不仅有病毒、细菌感染，害虫寄生这类生物胁迫，还有盐胁迫、干旱、高温和低温及重金属污染等非生物胁迫。非生物胁迫是减少农作物产量的主要原因，并且它的发生频率、程度和持续时间与全球气候变化显著相关^[16]。

1.2.1 盐胁迫

土地盐碱化成为近年来限制作物产量的主要因素之一，且未来 50%的耕地会受到盐胁迫的影响^[17]。植物受到盐胁迫时会严重失水，然后细胞的过度氧化损伤导致细胞结构被破坏^[18]。植物的生长发育过程中，过高的盐离子浓度会对植物导致不利的影响^[19]，可能会影响细胞内酶的活性和蛋白功能。胡燕梅等^[20]用不同浓度的 NaCl 溶液处理不同品种的玉米，结果证实盐胁迫不仅抑制玉米种子的萌发，对幼苗的生长也具有抑制作用，但不同玉米的耐盐性不同。在盐胁迫下，植物体内的抗盐机制会降低对 Na⁺ 的吸收，并阻止其向地面部分运输，以减少盐害^[21]。此外，植物体内的 ROS 清除机制、调节渗透压的物质和离子稳态机制均能缓解盐胁迫带来的危害^[22]。多项研究表明，对受盐害的玉米添加外源物质可减少盐害对玉米生长的抑制作用。彭浩等^[23]研究发现，低浓度（0~0.6%）的 NaCl 溶液能提高玉米的发芽率，但高浓度（0.9~1.5%）的 NaCl 溶液会严重抑制玉米的发芽率，添加一定浓度的外源水杨酸和脱落酸能适度缓解 NaCl 的胁迫。张成冉等^[24]研究发现添加适宜浓度的外源糖能够有效缓解 NaCl 胁迫，提高玉米的发芽率以及叶绿素含量和抗氧化酶的活性。

1.2.2 干旱

水分是影响植物生长的首要因素。一些研究表明,玉米种子在萌发过程和生长发育期中需要大量的水分,一方面,水可以软化种皮,为种子提供溶解氧,增加种子的渗透性,另一方面,水能作为营养物质和代谢物的溶剂,作为某些反应的原料。玉米种子在播种之后需要吸收超过 48% 的水分^[25],水分较低或较高都会影响种子的萌发,较低会使种子的酶活性难以激活,后期有可能生长不良,较高则会让种子长期浸泡导致缺氧,从而减缓发芽甚至立即死亡^[26]。因此,赵延成^[27]认为,将玉米种子发芽时的水分保持在 60% 左右最为适宜,不定期的水分补充也是必需的,但不宜太过频繁。

1.2.3 高温和低温

温度对玉米种子发芽有一定的影响。研究发现^[28],温度通过休眠对种子的萌发进行调控,进而影响种子的发芽速率。玉米种子在 25~28℃ 左右的适宜温度下萌发^[29]。适宜的温度能够软化种皮,加快种子吸水速率,增强相关酶的活性与呼吸作用。当温度过高(>45℃)或过低(<6.2℃)时,酶活性遭到抑制,玉米就无法发芽^[30]。徐婷等^[31]用不同温度(25、15 和 8℃)处理玉米种子,结果表明,低温胁迫显著降低种子的发芽率等萌发特性及 α -淀粉酶活性,且 15℃ 的处理组优于 8℃ 的组别,不同品种的玉米对低温胁迫的抵御能力也有显著差异。陈紫欣^[32]用不同温度培育不同品种的玉米种子,结果发现,在 25℃ 以内,随着温度的降低,不同品种的玉米的发芽率和发芽势均显著降低,且不同品种的玉米的耐寒性也不尽相同。有研究表明^[33],添加适量的外源甜菜碱可以显著提高处于低温胁迫下的玉米种子的萌发特性、幼苗的生长特性和抗氧化酶的活性,增强玉米种子的抗寒性。

1.2.4 重金属

大量研究表明,低浓度的重金属能够促进种子的萌发,但当其浓度过高时,则对所有植物的生长都起抑制作用。近年来,土壤中的重金属含量越来越高,因其不被微生物所分解,所以逐渐累积,影响植物的生长发育。土壤重金属污染主要因为镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌和镍等无机污染物含量超标^[34],其中镉的污染最严重。镉(Cd)会导致土壤酸化,降低土壤肥力,还能与羟基、氯化物形成化合物,使线粒体和叶绿

素受到较大破坏，导致呼吸作用和光合作用变弱，植株生物量下降。唐希望等^[35]的研究结果表明，不同浓度的 Cd^{2+} 对玉米萌发特性的影响也不相同，低浓度的 Cd^{2+} （5~10 mg/L）能提高玉米种子的发芽率，但高浓度的 Cd^{2+} （40 mg/L）却会使玉米种子的发芽率显著低于 CK 组，且高浓度 Cd^{2+} 对玉米根的影响大于对芽的影响，这是因为玉米萌发时对 Cd^{2+} 的吸收主要集中在根部。铅（Pb）具有很强的毒性，难以被生物降解，能够抑制植物的生长，严重影响作物的产量。姚伦富等^[36]选取糯玉米种子为试验材料，使用不同浓度的 Pb^{2+} 处理玉米种子，结果表明，单一的 Pb^{2+} （10 mg/L）处理对玉米种子的萌发特性有一定的促进作用，而高浓度的 Pb^{2+} （20~200 mg/L）则会对玉米种子的发芽率和发芽指数有不同程度的抑制，显著降低玉米萌发后的芽长和根长，且 Pb^{2+} 对根部的抑制率远大于对地上部分（芽、茎）的抑制率，根部是植物吸水的器官，与重金属离接触时间最长，所以根受到的抑制最严重。

1.3 不同处理对玉米中主要营养成分的影响

种子的萌发是一个复杂的物质转化过程，它不仅能提高种子的营养价值和蛋白质消化率，还会降低抗营养因子水平。玉米含有约 72% 的淀粉，10% 的蛋白质和 4% 的脂质，因其丰富的营养成分素有长寿食品的美称，与食用玉米相比，萌发后玉米的营养组成更合理，对人体的健康十分有益。发芽玉米的营养特性受玉米种类、发芽时间和处理条件等因素的影响。

1.3.1 淀粉和糖类

萌发期间，玉米中的淀粉酶活性增强，种子中的淀粉被分解成可供细胞呼吸作用消耗的小分子糖。郑冉等^[37]的研究表明，随着萌发天数增加，玉米的总淀粉含量降低，但随着光照时间的减少，玉米种子淀粉的消耗量呈逐渐下降的趋势，在 24 h 黑暗条件下发芽不同天数的玉米中淀粉含量最高，这表明，发芽使种子中的淀粉大量消耗，且不同的光照时间能够显著影响发芽玉米中淀粉含量。王一涛等^[38]用超声处理玉米种子，结果表明经过超声处理后，发芽玉米的还原糖含量显著高于 CK 组，其原因可能是超声波的空化效应和热加速玉米种子的种皮软化，提高吸水速率，使淀粉酶被快速激活，最终导致淀粉水解成还原糖。Karmakar 等^[39]用等离子体处理玉米种子，结果表明，不

同时间的处理均能提高玉米的总可溶性糖含量，这可能是处理组玉米植株产量增加的原因。迟宇新等^[40]用不同质量浓度的维生素处理玉米种子，研究表明 VB₁ 能显著提高 7 d 的发芽玉米中可溶性糖的含量，提高了玉米的抗逆性。薛云皓等^[41]的研究表明，玉米萌发至 120 h 时，淀粉含量已经从 74.37% 下降至 45.37%，而相应的，可溶性糖含量却从 2.63% 提高至 23.4%，这是因为在萌发时，玉米种子的淀粉在酶的作用下水解成小分子糖。张钟等^[42]的研究表明，黑糯玉米种子淀粉含量为 49.02%，还原糖含量为 4.87%，随着发芽时间的延长，淀粉含量持续下降，发芽 36 h 后仅有 27.30%，相反的，还原糖含量上升至 6.61%。姚英政等^[43]的研究表明，甜玉米种子的淀粉含量为 37.69%，发芽 48 h 后，淀粉含量显著下降，仅剩 29.37%，但总糖含量从 6.88% 提升至 17.85%。

1.3.2 蛋白质和氨基酸

由于缺少赖氨酸和色氨酸这两种必需氨基酸，所以玉米的蛋白质营养价值并不高，不能作为长期单一的主食。萌发初期，玉米种子分化成各种类型的细胞，形成胚根、根和小叶，消耗了大量蛋白质，但缺乏合成大量蛋白质的能力，导致蛋白质含量大大降低^[44]。有研究证明^[38]，玉米发芽后的总蛋白含量显著降低，主要原因是种子呼吸消耗所致，发芽过程中酶和氨基酸的合成却能使可溶性蛋白含量增加，超声处理后可大大升高发芽玉米粉中的可溶性蛋白含量，也可能是蛋白酶活性升高，促进水溶性蛋白、多肽及氨基酸的生成。Kaur 等^[45]的研究表明，玉米发芽 72 h 后，蛋白质含量从 10.7% 逐渐降低到 7.2%，并合成了新的氨基酸。玉米中含有人体无法合成的必需氨基酸，萌发能使玉米氨基酸的分布和组成更加合有益于人体。有研究证明^[46]，玉米发芽 72 h 后，非必需氨基酸的含量保持不变，但必需氨基酸的含量增加了 4%，蛋氨酸(17.3~30 mg/g)、苯丙氨酸(108.7~24.2 mg/g)、赖氨酸(18.9~25.8 mg/g)、缬氨酸(166.2~168.2 mg/g)、组氨酸(16.5~17.5 mg/g)、色氨酸(11.5~19.2 mg/g)等必需氨基酸含量在萌发 72 h 内呈上升趋势，亮氨酸和异亮氨酸含量则呈下降趋势。崔乃元等^[47]对玉米进行发芽试验，发现天冬氨酸的含量第 5 d 最高，不同氨基酸含量的峰值在不同天数出现，总体而言，赖氨酸、蛋氨酸、色氨酸等必需氨基酸含量显著提高。与上述研究相反，Chavarín-Martínez 等^[48]的研究发现，蓝色玉米发芽 207.7 h 后粗蛋白含量增加了 38.48%，这是因为玉米在发芽过程中干重减少（淀粉被消耗）以及新蛋白质的合成。Hiran 等^[49]的研究也发

现，避光处理下，玉米种子发芽后的粗蛋白含量从 12.1%增加为 15.7%，这是萌发使蛋白水解酶被激活并形成了蛋白质和非蛋白含氮物质。薛云皓等^[41]的研究表明，5 d 的发芽玉米中总蛋白含量从 10.4%减少至 10.2%，而可溶性蛋白含量从 1.08%增加到 3.88%，这是由于发芽时，种子的蛋白酶被激活，促使蛋白质水解形成易溶于水的小分子蛋白和氨基酸。

1.3.3 脂肪和脂肪酸

在发芽过程中，储存在玉米种子中的脂肪被相关酶分解为脂肪酸和甘油^[44]。Kaur 等^[45]的研究表明，黄玉米在 25°C 和 90% RH 条件下发芽 72 h，脂肪含量从 3.68%下降到 2.81%。墨西哥蓝色玉米在最佳发芽条件下（26.9°C/207.7 h），作为其发芽时的主要能量来源，脂肪含量降低了 35.5%^[48]。薛云皓等^[41]的研究表明，玉米发芽至 5 d 时，脂肪含量从 3.88%降至 3.71%。崔乃元等^[47]的用 25°C 进行玉米发芽试验，研究表明，玉米发芽 5 d 后，不饱和脂肪酸的含量显著高于种子，2 d 的发芽玉米还能有效提高脂肪酸的含量。

1.4 不同处理对玉米中活性成分富集的影响

芽苗类食品作为多种功能性成分的潜在来源，因其生理功效而受到广泛关注。因此，发芽谷物和豆类有望成为具有多种健康益处和药用价值的功能性膳食补充剂。适度的发芽处理可以富集生物活性物质，有利于生物活性功能食品的高效生产。

1.4.1 酚类物质

酚类物质是存在于玉米中的活性成分，能够有效清除自由基、降血糖、降血脂。萌发能激活玉米中的苯丙氨酸解氨酶，促进酚类化合物的合成。在萌发过程中，酯酶等细胞壁水解酶的激活降解细胞壁，并将结合复合物中的多酚释放到细胞基质中^[46, 48]。方晓敏等^[50]的研究表明，经过 3.5 mT 的静磁场处理 60 h 后，结合酚和游离酚含量较对照组都显著提高了，适度的磁场处理还提高了酚类合成途径中关键酶活性，结果分析表明，低频静磁场能够提高发芽玉米的总酚含量，提高发芽玉米的降糖能力。Kaur 等^[45]的研究表明，萌发 72 h 后，玉米的总酚含量相较于种子提高了两倍，这是因为发

芽期间，淀粉被水解，与之结合的酚类化合物随后被释放，所以总酚含量显著提高。Chalorchaoenyong 等^[51]的研究发现，发芽能提高玉米中总酚含量，7 d 的幼苗中总酚含量显著高于 24 h 的芽和玉米种子。Lu 等^[52]对 6 个品种的玉米进行发芽试验，观察到所有品种玉米的总酚含量在萌发时间内（3 d）均显著提高，其中 Hetian 4 的总酚含量提高了约 292.72%。

1.4.2 维生素

玉米富含多种维生素，比如 VC、VE、VB₁、VB₂ 和叶酸等，能够补充人体所需。发芽能显著提高玉米中各种维生素的含量，薛云皓等^[41]的研究表明，玉米发芽 72 h 后，核黄素含量比种子多 10 倍，VC 含量比种子提高了 24.25 mg/100 g。姚英政等^[43]的研究表明，甜玉米发芽 48 h 后，VC 的含量从未检出增加到 9.91 mg/100 g，VB₁ 含量有所下降，VB₂ 含量变化不大，VE 从 10.13 mg/100 g 增加到 12.59 mg/100 g。张钟等^[42]的研究表明，发芽黑糯玉米的 VB₂、VE 含量随着萌发时间的延长而增加，而 VB₁ 的含量发芽前后变化不大，这是由于黑糯玉米种子含有硫氨结合蛋白，发芽后能释放硫氨，使其稳定在一定水平。

1.4.3 类胡萝卜素

类胡萝卜素是体内 VA 的前体物质，因人体自身不能合成，所以需要从外界获取^[53]。玉米中超过 86.9% 的类胡萝卜素位于胚乳中，主要是叶黄素和玉米黄质^[7]。Lu 等^[52]对不同品种的玉米种子进行发芽实验，测定发芽后玉米中类胡萝卜素的含量，结果发现，叶黄素在萌发期间增长了 1.2~2.1 倍，不同品种玉米的类胡萝卜素富集量不同，Hetian 4 的萌发过程中的类胡萝卜素含量均高于其他品种。包怡红等^[54]的研究表明，发芽玉米不同部位的类胡萝卜素含量差异显著。72 h 的胚芽中类胡萝卜素含量是种子的 6.19 倍，叶黄素含量是种子的 5 倍多，玉米黄质含量较种子有所增加。徐昊等^[55]研究脱落酸处理对玉米中类胡萝卜素的合成的影响，在 5 mg/L 的脱落酸的处理下，3 d 的发芽玉米类胡萝卜素含量最高，此时的叶黄素和玉米黄质的含量都比 CK 组显著提高，PCR 结果表明，脱落酸能够显著提高合成类胡萝卜素的基因表达量。Xiang 等^[56]的研究表明，玉米芽中含有 10 种类胡萝卜素，其中，3 d 的玉米芽中叶黄素含量最高。不同光

质诱导了类胡萝卜素的积累，白光组的类胡萝卜素含量最高，比对照提高了 16 倍，蓝光组的 β -OHase 基因的表达水平显著高于其余处理组。Luo 等^[57]用 MeJA 处理玉米种子，发现在 0.5 μ M MeJA 的处理下，叶黄素含量较 CK 提高了 42.5%，这是因为 MeJA 作为一种植物生长调节剂，可以上调类胡萝卜素合成途径关键酶的基因表达水平，促进玉米芽中类胡萝卜素的合成。He 等^[58]的研究发现 NaCl 单独处理和 MeJA 联合处理均能促进 3 d 的玉米芽中类胡萝卜素的含量，添加 MeJA 可以缓解 NaCl 胁迫带来的有害影响，二者协同下，叶黄素含量最高可达 14 μ g/g，较 CK 提高了 58.0%。

1.5 研究内容及目的意义

1.5.1 研究内容和方法

本研究以玉米种子为原材料，对种子微波处理后进行发芽试验，研究不同微波处理对玉米萌发特性的影响，并探究不同的微波处理条件对发芽玉米中主要营养成分、活性成分及抗氧化活性的影响。主要内容如下：

（1）研究不同微波处理对玉米种子微观结构、萌发特性（发芽率、发芽势、发芽指数）和 AGT 及玉米萌发后的芽长、可食部分鲜重和呼吸速率的影响。

（2）研究不同微波处理对发芽玉米中主要营养成分（水分、淀粉、还原糖、可溶性蛋白、游离氨基酸和脂肪）含量和淀粉酶活性的影响。

（3）研究不同微波处理对发芽玉米中 MDA 含量和活性成分（脯氨酸、总酚、VC 和类胡萝卜素）含量的影响。

（4）研究不同微波处理对发芽玉米不同部位（根部、籽粒和芽苗）中叶黄素含量的影响。

（5）研究不同微波处理对发芽玉米中抗氧化能力（DPPH 与 ABTS 自由基清除能力和 FRAP）及抗氧化酶（SOD、POD 和 CAT）活性的影响。

1.5.2 研究目的及意义

发芽能够提高玉米的营养价值，增加玉米中的活性成分，如类胡萝卜素、酚类物质、GABA 和维生素，大幅提升抗氧化活性。有研究表明种子进行微波处理后水分通透性增加，酶的活性升高，从而提升种子的发芽率以及诱导幼苗中活性成分的富集。

为了充分利用玉米资源，拓展发芽玉米类功能性食品的新领域，减少因化学类试剂处理玉米种子对环境的污染，探讨微波处理对玉米发芽中主要营养成分和活性成分的动态变化具有重要意义，为发芽玉米类功能性食品的开发提供理论依据。

第 2 章 微波处理对玉米萌发中生理指标的影响

2.1 引言

种子发芽过程中受环境因素影响，而发芽过程最终影响作物的产量和品质。一些报道称等离子体^[39]、静磁场^[50]、超声波^[59]等外部刺激可以提高种子的发芽率。

微波是频率范围为 300 至 300000 MHz 的非电离辐射，可以打破种子休眠和改善种子发芽特性^[60]。早在 1977 年，Bigu 等^[61]就研究了微波辐射处理对玉米种子生长速率的影响。结果表明，在 10~30mW/cm² 的功率密度水平下，连续微波照射 22~24 小时可显著抑制玉米种子的生长，这可能是由于水分损失所致。之前的研究表明，微波处理可以提高小麦^[62]、水稻^[63]和苦荞^[64]等作物的发芽率和幼苗活力。研究证明^[65]，微波发射的能量可以穿透谷物，加剧种子中水分子的运动，增加胚胎的吸水能力，从而提高种子的发芽率。总体而言，微波处理对种子发芽的影响与种子种类、微波频率、微波功率和微波时间有关。

本章选取了 5 种不同的玉米，研究了种子的萌发特性和叶黄素含量，并选择其中叶黄素含量最高的一种玉米，对其进行微波处理，研究不同微波处理对玉米微观结构、萌发特性和芽苗生长的影响。

2.2 材料与设备

2.2.1 实验材料

表 2-1 实验材料
Table 2-1 Experimental materials

材料名称	厂家
美糯 1 号 (MN)	北京芳萱苑种子有限公司
华良 165 (HL)	山东华良种业有限公司
郑单 958 (ZD)	河南大成种业有限公司
弘展 899 (HZ)	河南弘展农业科技有限公司
强硕 168 (QS)	营口佳昌种子有限公司

2.2.2 实验试剂

表 2-2 实验试剂

Table 2-2 Experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
高锰酸钾	AR	国药集团化学试剂有限公司
无水乙醇	AR	国药集团化学试剂有限公司
正己烷	AR	国药集团化学试剂有限公司
丙酮	AR	国药集团化学试剂有限公司
甲苯	AR	国药集团化学试剂有限公司
氢氧化钾	AR	国药集团化学试剂有限公司
叶黄素标准品	≥90%	上海麦克林生化科技有限公司

2.2.3 实验仪器

表 2-3 实验仪器

Table 2-3 Experimental equipment

仪器名称	型号	厂家
电子天平	JY-1002	上海良平仪器仪表有限公司
光照种子发芽箱	YRG-300	上海合恒仪器设备有限公司
微波炉	P7021TP-6	芜湖众维教研仪器研发公司
可见分光光度计	L3S	上海仪电分析仪器有限公司
真空冷冻干燥机	LGI-10	北京松源华兴科技发展有限公司
医用离心机	TGL-16A	长沙平凡仪器仪表有限公司
液晶超声清洗器	KS-500DE	昆山洁力美超声仪器有限公司

2.3 实验方法

2.3.1 玉米发芽试验

挑选籽粒饱满、无明显霉菌污染的玉米种子,置于 1%的高锰酸钾溶液消毒 20 min,而后用蒸馏水冲洗至表面澄清,最后于 25℃ 去离子水中浸泡 24 h。

微波处理: 根据对五种玉米的初步探究,发现 ZD 的发芽率及叶黄素含量最高,所以选择 ZD 进行微波处理。将浸泡后的玉米滤干水分后均匀的铺放在培养皿中进行微波预处理。分组: 在微波功率 200W 下分别处理 10、20、20、40、50 s; 分别在 150、200、250、300、350 W 的微波功率下处理 20 s。每个培养皿放置 30 粒玉米种子,胚乳向上进行微波处理。并设置未经微波处理的对照组 CK。

发芽试验: 将 CK 组和微波处理组的玉米种子均匀的摆放在铺有滤纸的发芽盘上,

置于人工培养箱（25℃，80% RH）中进行培养。

2.3.2 发芽玉米样品的制备

分别收集 4、7、10 d 的发芽玉米，去除根部，冷冻干燥后研磨成粉，过 60 目筛，低温密封保存用于后续实验。

2.3.3 发芽率和发芽势的测定

种子发芽标准和发芽势、发芽率均按照 GB/T5520-2011 进行测定，计算公式如式 2-1、式 2-2 所示。

$$\text{发芽率 (GR)} = \frac{\text{7d 内正常发芽种子数}}{\text{一组试样种子数}} \times 100\% \quad (\text{式 2-1})$$

$$\text{发芽势 (GP)} = \frac{\text{3d 内正常发芽种子数}}{\text{一组试样种子数}} \times 100\% \quad (\text{式 2-2})$$

2.3.4 发芽指数的测定

发芽指数为 t 天内的发芽种子数与发芽天数的比值之和，计算公式如式 2-3 所示。

$$\text{发芽指数(GI)} = \sum \frac{G_t}{D_t} \quad (\text{式 2-3})$$

式中：G_t—t 时间内发芽的种子数；

D_t—对应的天数 t。

2.3.5 AGT 的测定

AGT 为 7 d 内每天发芽种子数与发芽天数的乘积之和与最终发芽种子总数的比值，计算公式如式 2-4 所示。

$$\text{AGT} = \frac{\sum G_t \times D_t}{\text{正常发芽种子总数}} \quad (\text{式 2-4})$$

式中：G_t—t 时间内发芽的种子数；

D_t—对应的天数 t。

2.3.6 芽长和可食部分鲜重的测定

随机选取 4、7、10 d 长势均匀的 10 株芽苗，去除掉根部，用电子天平测定其鲜重，取平均值视为每株的可食部分鲜重；用直尺测量芽苗长度，取平均值视为每株芽

苗的长度。

2.3.7 叶黄素含量的测定

叶黄素含量的提取参考包怡红等^[54]的方法，并进行修改。将样品与萃取液（正己烷-乙醇-丙酮-甲苯）混合提取 20 h 后加入 2 mL 40% KOH-乙醇溶液，置于暗处皂化 4 h。而后向分液漏斗中依次加入样品液、正己烷、硫酸钠溶液，静置分层，收集上清，重复提取，合并上清并补足至 50 mL，在 445 nm 处测定待测液 OD 值。叶黄素标准曲线为 $y=0.112x-0.0004$ ， $R^2=0.9998$ 。

2.3.8 呼吸速率的测定

参考汪雨茜的方法测定呼吸速率^[66]。

空白组：将 20 mL Ba(OH)₂ 溶液加入洁净干燥的集气瓶中，塞紧塞子，摇晃瓶子使 CO₂ 被吸收完全，随即拔掉塞子，加入酚酞指示剂后，迅速盖上塞子，将滴定管插入塞子的小孔中。用草酸溶液滴定，直到红色消失。

样品组：另取一只干燥洁净的集气瓶，加入相同体积的 Ba(OH)₂ 溶液，将发芽玉米放置在塞子钩住的小篮子中，盖紧塞子，每隔 10 min 晃动瓶口数次，使 CO₂ 被吸收完全，30 min 后迅速拆除反应装置，重复空白组操作，用草酸溶液滴定至红色消失。呼吸速率的计算公式如式 2-5 所示。

$$\text{呼吸速率 (mg CO}_2\text{/g/h)} = \frac{(V_0 - V) \times 1}{m \times t} \quad (\text{式 2-5})$$

式中：V₀—滴定空白组所消耗的草酸体积，mL；

V₁—滴定样品组所消耗的草酸体积，mL；

1—每毫升 $\frac{1}{44}$ mol/L 的草酸，相当于 1 mg CO₂；

m—样品质量，g；

t—反应时间，h。

2.3.9 玉米种子微观结构的测定

将经过微波处理和 CK 组的玉米种子冻干、研磨过筛后的粉末固定于样品台上，喷金镀膜后，在 5 kV 的加速电压下，放大 3000 倍进行 SEM 分析^[67]。

2.4 数据统计与分析

各项指标的测定设 3 次平行实验, 结果以 Mean $\pm$ SD 的形式表示。采用 Excel 2019 初步整理实验数据, 用 SPSS 22.0 进行显著性分析, 采用 Sigma Plot 12.0 绘制图表。

2.5 结果与分析

2.5.1 不同玉米的萌发特性

表 2-4 不同玉米的主要生长指标

Table 2-4 Main growth indexes of varieties of maize during germination

种类	GP/%	GR/%	GI	AGT/d	芽长/cm
MN	81.33 $\pm$ 4.16 ^b	93.33 $\pm$ 4.16 ^b	31.49 $\pm$ 1.63 ^b	2.05 $\pm$ 0.09 ^b	13.83 $\pm$ 0.85 ^a
HL	100.00 $\pm$ 0.00 ^a	100.00 $\pm$ 0.00 ^a	41.50 $\pm$ 0.76 ^a	1.42 $\pm$ 0.05 ^c	9.47 $\pm$ 0.35 ^b
ZD	78.67 $\pm$ 1.15 ^b	90.67 $\pm$ 1.15 ^b	31.16 $\pm$ 0.69 ^b	2.08 $\pm$ 0.08 ^b	14.23 $\pm$ 0.51 ^a
HZ	66.00 $\pm$ 2.00 ^c	79.33 $\pm$ 3.06 ^c	23.57 $\pm$ 1.12 ^c	2.29 $\pm$ 0.01 ^a	7.50 $\pm$ 0.36 ^c
QS	79.33 $\pm$ 2.31 ^b	91.33 $\pm$ 4.16 ^b	31.21 $\pm$ 0.82 ^b	2.00 $\pm$ 0.08 ^b	14.40 $\pm$ 0.46 ^a

注: 不同小写字母代表不同处理间存在显著性差异 ($P<0.05$), 下同

Note: Different lowercase letters in the same row denote significant differences ($P<0.05$), the same below

由表 2-4 可知, HL 的发芽率最高, 达到 100%, MN、QS、ZD 的发芽率均达到 90%以上, 但 HZ 的发芽率仅有 79.33%; HL 的发芽指数最高 (41.50), 是 HZ 的 1.76 倍; HZ 的 AGT 最长 (2.29 d), 比 ZD 的 AGT 延长了 10.10%; QS、ZD 和 MN 的芽长无明显差异, HZ 的芽长仅为 7.50 cm。

总体上说, 种子的发芽势和发芽率都高则意味着作物长得又快又整齐, 若种子的发芽率高, 而发芽势低则说明作物出苗不齐, 弱苗多^[68]。发芽指数的高低、AGT 的长短和芽苗的长短则体现了种子的活力大小。虽然 HL 的发芽势、发芽率、发芽指数和 AGT 在 5 种玉米中都属最优, 但 7 d 芽长仅有 9.47 cm, 这与杨孝臣等^[69]对甜玉米的生物学特征描述相似。

2.5.2 不同玉米的叶黄素含量

由图 2-1 (A) 可知, 发芽可大大提高玉米中叶黄素的含量, 且随着发芽时间的延长, 普通玉米 (QS、ZD、HZ) 叶黄素含量的增加速率比糯玉米 (MN) 和甜玉米 (HL) 快。ZD 生长过程中的叶黄素含量显著高于其他品种, 且生长到第 7 d 时的叶黄素含量

为 11.56 mg/100 g，是种子（0.37 mg/100 g）的 31.24 倍；HZ、QS、MN 和 HL 第 7 d 的叶黄素含量分别是种子的 23.25、20.48、32.99 和 15.79 倍。

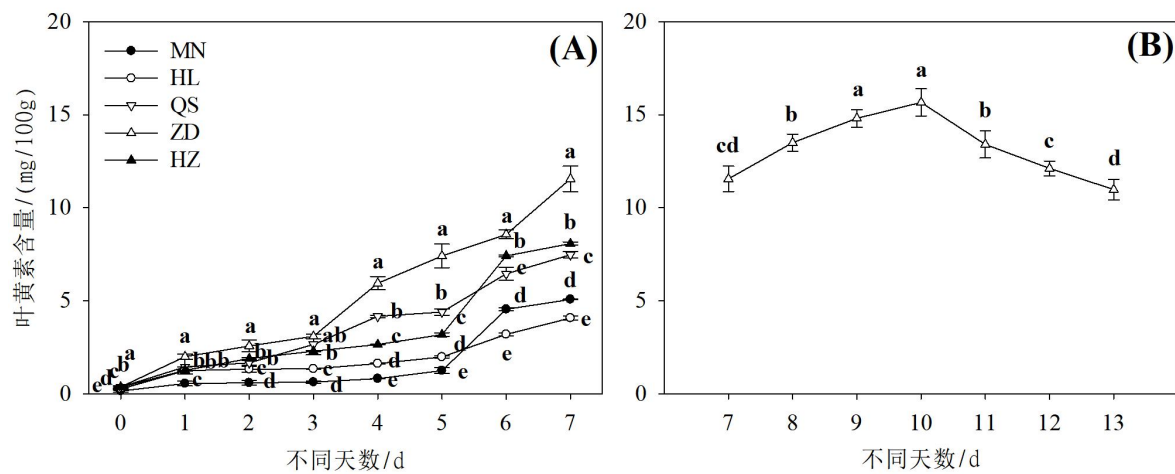


图 2-1 不同玉米的叶黄素含量 (A) 和 ZD 的叶黄素含量 (B)

Fig.2-1 Lutein content of varies kinds of maize (A) and Lutein content of ZD (B)

如图 2-1 (B) 所示，ZD 的叶黄素含量随着发芽时间的延长呈现先增加后降低的趋势，生长至第 10 d 时，叶黄素含量达到峰值，为 15.67 mg/100 g，相较于第 7 d 增长了 35.54%；生长至第 13 d 时，叶黄素含量甚至低于 7 d 的发芽玉米，为 10.98 mg/100 g，比第 10 d 降低了 42.72%。

2.5.3 微波处理对玉米萌发特性的影响

从表 2-5 中可以看出，一定条件的微波处理可以显著提高玉米的发芽率、发芽势，降低平均发芽天数，提高发芽指数 ($P < 0.05$)。在 200 W/20 s 的微波处理下，玉米的发芽率达到 99.33%，比 CK 高 8.66%，AGT 比 CK 减少了 12.02%，发芽指数是 CK 的 1.21 倍。虽然 350 W/20 s 的微波处理抑制了玉米的最终发芽率，但它可以缩短 AGT，提高发芽指数。这与 Wang 等^[70]对苦荞麦种子的研究类似。适度的微波处理（200~600 W/10 s）能促进苦荞的发芽率，但功率过高（800 W/10 s）或时间过长（400~800 W/30 s）的微波处理则会抑制种子的发芽率。上述研究表明，微波处理只在特定的功率和时间范围内能有效促进种子发芽。

发芽率的提高可能与微波处理后玉米中代谢合成酶活性的加速激活^[64]以及各种成分结构的变化有关。但过高的微波功率和过长的微波时间会钝化种子中的酶，甚至

使其失活^[71]，从而降低玉米的发芽率。玉米的加速发芽表明微波处理对细胞分化有积极影响，因此有必要对微波处理的发芽玉米的形态和成分进行研究。

表 2-5 微波处理对玉米萌发特性的影响

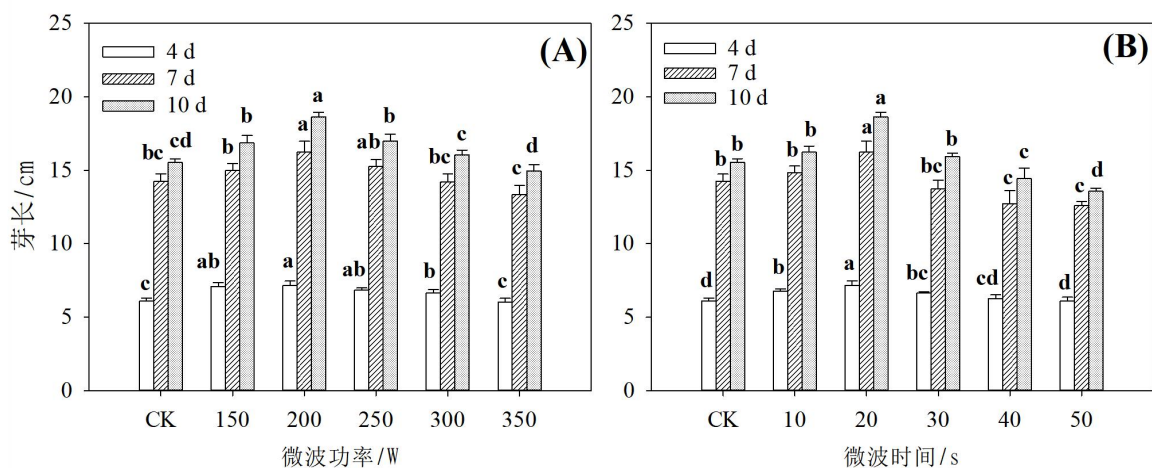
Table 2-5 Effect of microwave treatment on germination characteristics of maize

微波处理	GR/%	GP%	AGT/d	GI
CK	90.67±1.15 ^c	78.67±1.15 ^d	2.08±0.08 ^a	30.16±0.69 ^d
150 W/20 s	95.33±1.15 ^{bc}	86.67±1.15 ^{ab}	1.90±0.06 ^{bc}	34.09±0.68 ^b
200 W/20 s	99.33±1.15 ^a	88.67±3.06 ^a	1.83±0.04 ^c	36.39±0.54 ^a
250 W/20 s	97.33±1.15 ^{ab}	86.00±0.00 ^{abc}	1.92±0.02 ^{bc}	33.85±0.42 ^{bc}
300 W/20 s	94.67±1.15 ^{bcd}	84.00±2.00 ^{abc}	1.92±0.09 ^{bc}	32.67±0.63 ^c
350 W/20 s	90.00±3.06 ^e	78.67±2.31 ^d	2.01±0.03 ^{ab}	30.43±0.29 ^d
200 W/10 s	98.00±3.46 ^{ab}	86.00±4.00 ^{abc}	1.92±0.09 ^{bc}	34.77±1.13 ^b
200 W/30 s	96.67±1.15 ^{abc}	84.67±1.15 ^{abc}	1.96±0.04 ^{abc}	33.93±0.42 ^{bc}
200 W/40 s	93.33±2.31 ^{cde}	82.00±3.46 ^{bcd}	1.99±0.03 ^{ab}	31.09±0.97 ^d
200 W/50 s	91.33±3.06 ^{de}	81.33±4.16 ^{cd}	1.99±0.14 ^{ab}	30.96±1.03 ^d

注：CK 代表未经微波处理的对照组，150~350 W 和 10~50 s 代表微波功率和时间。

Note: CK represents untreated microwave, 150~350 W and 10~50 s represent microwave power and time, respectively.

2.5.4 微波处理对玉米芽长的影响



注：(A) 图微波时间为 20 s，(B) 图微波功率为 200 W，下同

图 2-2 微波处理对玉米芽长的影响

Note: The microwave time in the left picture is 20 s, and the microwave power in the right picture is 200 W, the same below

Fig.2-2 Effect of microwave treatment on the length of maize sprouts

芽长是植物生长发育的重要指标，可以反映植物的健康状况。玉米种子在适宜的水分和温度下，胚根会逐渐突破种皮，当胚根生长至 1~2 mm 时，胚芽也会突破种皮，并且在水分充足、温度适宜的环境下直立向上生长。随着发芽时间的延长，玉米的芽

长逐渐增加（图 2-2）。适度的微波处理能显著提高玉米的芽长（ $P<0.05$ ），且 200 W 微波处理 20 s 后，第 10 d 的芽长达到了 18.63 cm，相较于 CK 提高了 19.96%，但当微波功率>350 W（20 s）或微波时间>50 s（200 W）时，玉米芽的生长会受到抑制，并显著低于 CK（ $P<0.05$ ）。王顺民等^[72]对豌豆的研究也证明了过长的微波处理时间（30 s）会抑制豌豆芽的生长，但在一定时间（10 s）内，微波处理能显著增加豌豆的芽长。结果表明，微波处理可能通过提高植物体内激素水平来促进玉米芽的生长。

2.5.5 微波处理对发芽玉米可食部分鲜重的影响

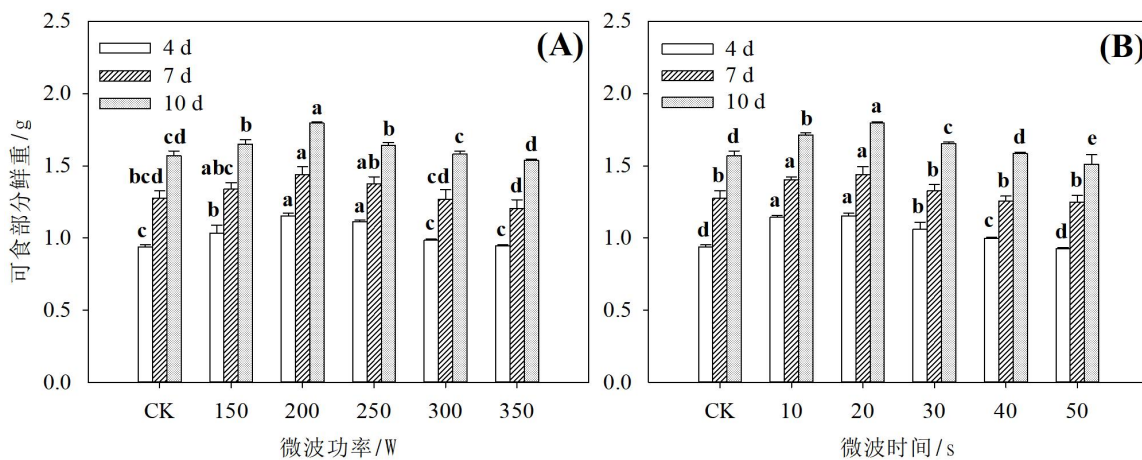


图 2-3 微波处理对发芽玉米可食部分鲜重的影响

Fig.2-3 Effect of microwave treatment on the fresh weight of edible parts of germinated maize

鲜重是植物体在自然状态下刚采集测得的质量，代表作物的产量。发芽玉米的可食部分鲜重随着发芽时间的延长逐渐增加（图 2-3）。玉米发芽时，不仅需要消耗自身储存的大量有机物为生命活动提供能量，而且还会吸收大量的水，所以鲜重大大增加。与玉米芽长的结果类似，适度的微波处理能显著增加发芽玉米的可食部分鲜重（ $P<0.05$ ），200 W/20 s 的微波处理下，第 10 d 的可食部分鲜重为 1.79 g，是 CK 的 1.14 倍，但过高的功率和过长的时间的微波处理都会使发芽玉米的可食部分鲜重降低。张蕊思等^[73]研究发现，较高的微波功率或较短的微波时间对冰草幼苗的鲜重积累有促进作用，而较低的微波功率和较长的微波时间会减少鲜重。Jakubowski 等^[74]研究发现频率为 2.45 GHz 的微波辐射对马铃薯种子胚芽和 Felka Bona 品种马铃薯块茎作物的重量有积极影响。分析表明，适度微波处理能促进植株生长，增加可食用部分鲜重，提高作物产量。

2.5.6 微波处理对玉米呼吸速率的影响

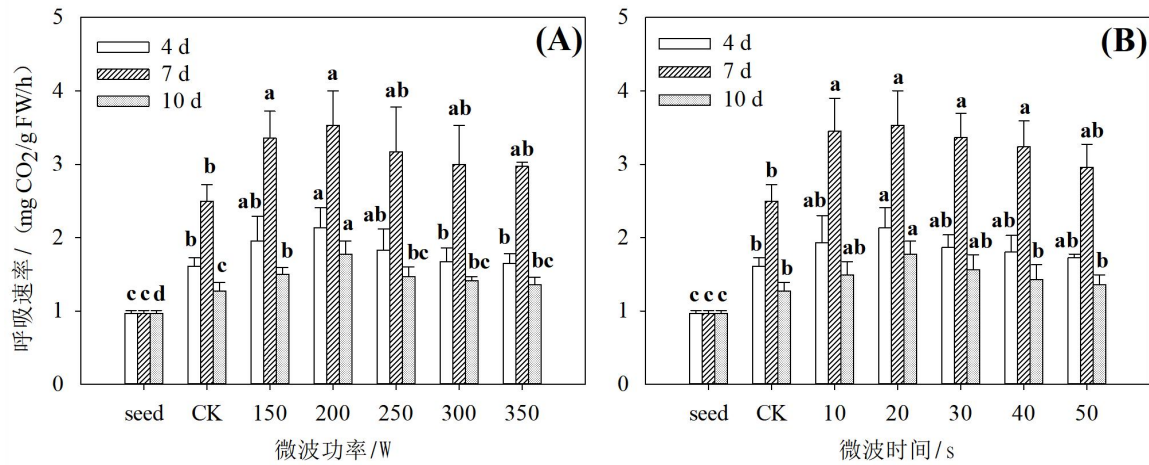


图 2-4 微波处理对发芽玉米呼吸速率的影响

Fig.2-4 Effect of microwave treatment on the respiratory rate of germinated maize

高等植物通过细胞呼吸分解营养物质，为自身提供生命活动所需的能量和原料。

细胞呼吸是植物代谢的中枢。呼吸频率的大小可以反映有机体代谢活动的强度。

图 2-4 表明，发芽玉米的呼吸速率均显著高于种子 ($P < 0.05$)，且随着发芽时间的延长先上升后下降。微波处理能显著提高发芽玉米的呼吸频率 ($P < 0.05$)，在 200 W/20 s 的微波处理下，发芽 7 d 的呼吸速率最高，为 3.53 mg CO₂/g FW/h，比 CK 提高了 41.50%，是种子的 3.65 倍。适度的微波处理使种子快速升温，促进玉米中呼吸酶的活性，进而提高发芽玉米的呼吸速率，过高的微波功率和过长的微波时间会使种子吸收过多的热能，导致玉米中相应酶活性降低甚至失活，从而抑制发芽玉米的呼吸速率。胡燕月等^[75]研究也证明微波处理可显著提高种子的呼吸速率，水稻种子经过 450 W/20 s 的微波处理萌发 24 h 后，胚的呼吸速率较 CK 提高了 43.33%。

2.5.7 微波处理对玉米种子微观结构的影响

玉米种子的大部分贮藏物质在胚乳内^[76]，主要有淀粉、脂肪和蛋白质，为种子萌发提供能量^[77]。如图 2-5A 所示，未经处理的玉米胚乳中蛋白质基质与淀粉紧密结合，淀粉颗粒呈饱满光滑状态。图 2-5B 为 200 W 微波处理 20 s 后玉米胚乳的微观结构，由箭头指向可以看出，淀粉颗粒表面仍然光滑饱满，但蛋白质基质与淀粉之间的结合开始松动，没有明显的结构变化。在 200 W 微波功率下处理 50 s 后（图 2-5D，箭头），胚乳淀粉颗粒形状变的不规则，淀粉颗粒表面凹陷、粘连明显，蛋白质基质逐渐从淀

粉颗粒中分离出来。在 300 W/20 s 的微波处理下（图 2-5 C，箭头），淀粉颗粒表面不再光滑饱满，粘连现象增加，蛋白质基质大规模脱离淀粉颗粒。低功率短时间微波处理对玉米胚乳中淀粉颗粒的损伤不明显，保留了淀粉颗粒与蛋白质基质的结合状态，然而，随着微波功率和微波时间的增加，淀粉颗粒表面变得粗糙、凹陷，这表明微波发射的能量使淀粉内部分子发生迁移，导致颗粒内部结构重新排列^[78, 79]。渠琛玲等^[80]的研究表明，微波功率 700 W 处理 20 s 后的小麦胚乳中淀粉与蛋白质基质依旧结合紧密，破损淀粉含量比 CK 高 4%，处理 40~50 s 后胚乳中淀粉颗粒才出现变形和破裂。

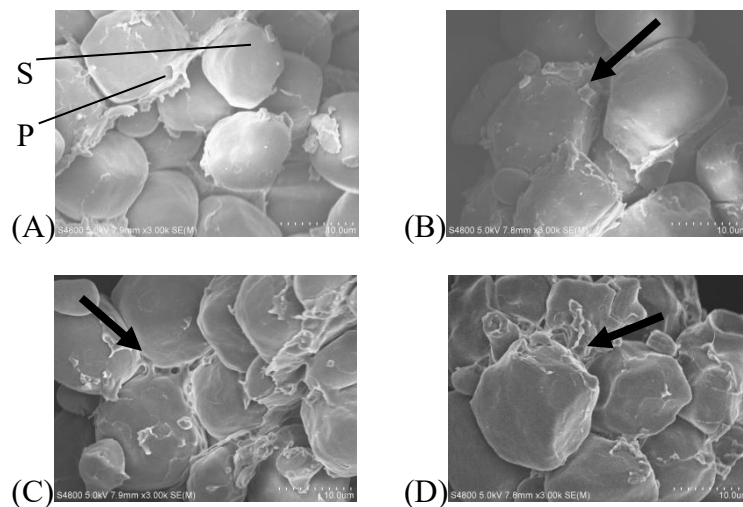


图 2-5 微波处理对玉米种子微观结构的影响

Fig.2-5 Effects of microwave treatment on the microstructure of maize seeds

注：(A) CK; (B) 200 W/20 s; (C) 300 W/20 s, (D) 200 W/50 s. P 代表蛋白质基质；S 代表淀粉

Note: (A) CK; (B) 200 W/20 s; (C) 300 W/20 s, (D) 200 W/50 s. P represents Protein matrix; S represents Starch

2.6 本章小结

本章主要研究了 5 种玉米的萌发特性及发芽后的叶黄素含量，并筛选出叶黄素含量最高的一种玉米，进行后续实验。采用不同微波处理条件对玉米进行处理，研究微波处理后玉米种子的微观结构、萌发特性、芽长、可食部分鲜重和呼吸速率的变化。结果表明，ZD 的叶黄素含量显著高于其他品种 ($P<0.05$)，并且随着发芽时间的延长，叶黄素含量呈现先上升后下降的趋势，发芽至第 10 d 含量最高，为 15.67 mg/100g。适度的微波处理可以显著提高玉米的萌发特性，微波功率 200 W 处理 20 s 后，玉米种子的发芽势、发芽率、发芽指数和 AGT 分别是 88.67%、99.33%、36.39 和 1.83 d。适

度的微波处理能够显著提高玉米的芽长和可食部分鲜重，在 200 W/20 s 的微波处理下第 10 d 的芽长达到了 18.63 cm，可食部分鲜重为 1.79 g。微波处理可以显著提高发芽玉米的呼吸速率，提高玉米的代谢速率，且微波功率 200 W 处理 20 s 后 7 d 的发芽玉米呼吸速率最高，为 3.53 mg CO₂/g FW/h，比 CK 提高了 41.50%。

微波处理可以改变玉米种子原有的细胞结构，SEM 图观察到 200 W/20 s 的微波处理后的玉米种子胚乳中蛋白质基质与淀粉粒的结合开始疏松，随着微波功率的增大和微波时间的延长，淀粉粒表面开始凹陷，且淀粉粒之间产生粘结现象，蛋白质基质大面积的脱离淀粉粒。

第 3 章 微波处理对发芽玉米中主要营养成分的影响

3.1 引言

萌发是高等植物生长周期的关键阶段，种子会发生一系列生理和形态变化^[81]，与种子相比，发芽谷物含有更高的营养价值和蛋白质消化率以及较低的抗营养因子水平^[82]。因此，发芽被认为是一种绿色、简单、有效的提高谷物营养价值和减少抗营养因子的方法。玉米含有大量的淀粉、膳食纤维、蛋白质、脂肪等营养物质^[83]，萌发可提高其营养价值。微波不仅能影响种子的萌发特性，还能显著改变发芽谷物中各成分的含量。王顺民等^[70]的研究表明，在 300 W 功率下微波 30 s 后，3 d 的豌豆芽中的可溶性蛋白含量最高，为 15.47 mg/100 mg，而在 300 W/10 s 的微波处理下，3 d 的豌豆芽中还原糖含量最高，为 10.11 mg/100 mg。Ma 等^[64]的研究表明，300 W/50 s 的微波辐照可增强萌发苦荞淀粉酶的活性，使 5 d 苦荞芽的还原糖含量增加 7.51 倍，不同微波处理也提高了种子萌发过程中各种氨基酸和脂肪酸的含量。然而，微波处理对发芽玉米的营养成分和生理生化特性影响的研究仍然有限。

本章采用不同的微波条件处理玉米种子，研究微波对玉米发芽后主要营养成分（水分、淀粉、还原糖、可溶性蛋白、游离氨基酸和粗脂肪）的含量和淀粉酶活性的影响。

3.2 材料与设备

3.2.1 实验材料

郑单 958，购自河南大成种业有限公司，置于-4° C 冰箱进行储存。

3.2.2 实验试剂

表 3-1 实验试剂

Table 3-1 Experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
碘	AR	国药集团化学试剂有限公司
碘化钾	AR	国药集团化学试剂有限公司
酒石酸钾钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
3, 5-二硝基水杨酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
氢氧化钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
苯酚	AR	国药集团化学试剂有限公司
亚硫酸钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
考马斯亮蓝 G-250	AR	国药集团化学试剂有限公司
磷酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
磷酸二氢钾	AR	国药集团化学试剂有限公司
磷酸氢二钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
茚三酮	AR	国药集团化学试剂有限公司
石油醚	AR	国药集团化学试剂有限公司
葡萄糖	AR	国药集团化学试剂有限公司
牛血清清蛋白	A116563	阿拉丁

其他主要试剂同 2.2.2。

3.2.3 实验仪器

表 3-2 实验仪器

Table 3-2 Experimental equipment

仪器名称	型号	厂家
脂肪测定仪	SZF-06A	上海新嘉电子有限公司
热风干燥箱	GZX-9146	上海博迅实业有限公司医疗设备厂
恒温水浴锅	HH-2	常州市凯航仪器有限公司

其他主要仪器同 2.2.3。

3.3 实验方法

3.3.1 玉米发芽试验

玉米发芽试验同 2.3.1。

3.3.2 发芽玉米样品的制备

分别收集 4、7、10 d 的发芽玉米，去除根部，冷冻干燥后研磨成粉，过 60 目筛，低温密封保存用于后续实验。

3.3.3 水分含量的测定

取适量发芽玉米（鲜样），去除根部，用去离子水冲洗干净后擦干，称重并记录，置于洁净、干燥的培养皿中，而后放于热风干燥箱（105℃）中干燥 6 h，冷却 30 min 后称重，继续干燥 1 h，重复上述操作，直至最后一样的样品质量与上一次测的质量差 ≤ 0.2 mg，根据减少的质量计算发芽玉米的水分含量。

3.3.4 淀粉和还原糖含量的测定

参考 Lu 等^[84]的研究方法测定淀粉含量。称取 2 g 发芽玉米粉，用慢速定量滤纸除去脂肪（60℃~90℃ 石油醚）和可溶性糖（85%乙醇）后，将样品依次暴露于高氯酸（9.2 M 和 4.6 M）中，用去离子水洗涤两次。样品中的还原糖含量采用 DNS^[85]法测定，以此换算出样品中的淀粉含量（换算系数为 0.9）。

3.3.5 淀粉酶活性的测定

根据 Ma 等^[64]的研究方法测定淀粉酶的活性。称取 2.0 g 发芽玉米（鲜样）与 8 mL 去离子水冰浴中研磨。离心(3000×g, 10 min)后，取上清液放置 35℃ 水浴锅中保温 10 min，加入盐酸灭活。采用 DNS 法测定麦芽糖含量。一个酶活性单位（U）定义为在 35° C 下每克样品每分钟淀粉水解产生的麦芽糖当量的还原糖量。

3.3.6 可溶性蛋白含量的测定

可溶性蛋白的含量采用 Bradford^[86]的方法测定。向 2.0 g 发芽玉米粉中加入 10 mL 去离子水，振荡提取 30 min 后离心（8000×g，10 min），重复上述提取操作，合并两次提取液并补充至 50 mL。取 1 mL 提取液与 5 mL 考马斯亮蓝溶液混合，摇匀后静置 2 min，于 595 nm 处测 OD 值。可溶性蛋白标准曲线为 $y=0.0051x-0.0132$ ， $R^2=0.9927$ 。

3.3.7 游离氨基酸含量的测定

游离氨基酸含量的测定参考 Yousaf 等^[87]的方法，并进行修改。向 0.2 g 发芽玉米粉中加入 5 mL 去离子水，超声提取 15 min 后离心（5000×g，10 min），上清即为待测液。将 1 mL 样品液、1 mL 磷酸缓冲液、1 mL 2%茚三酮溶液依次加入 25 mL 容量瓶中，沸水浴加热 15 min，待容量瓶和溶液完全冷却后定容，静置 5 min 后在 570 nm 处

测定 OD 值。亮氨酸标准曲线为 $y=0.0049x-0.0504$, $R^2=0.9909$ 。

3.3.8 粗脂肪含量的测定

参考食品安全国家标准 (GB 5009.6—2016) 测定粗脂肪的含量。脂肪提取器提前预热至 75°C , 并打开水龙头阀门, 降低冷凝管温度。将发芽玉米粉 (2 g) 用滤纸包好, 放入提取瓶中, 并将索氏提取器组装完成, 缓慢倒入 50 mL 石油醚。提取 10 h 后, 将圆底烧瓶水浴加热至石油醚蒸发完全, 干燥其至恒重时记录质量, 并计算脂肪含量。

3.4 数据统计与分析

数据统计与分析同 2.4。

3.5 结果与分析

3.5.1 微波处理对发芽玉米水分含量的影响

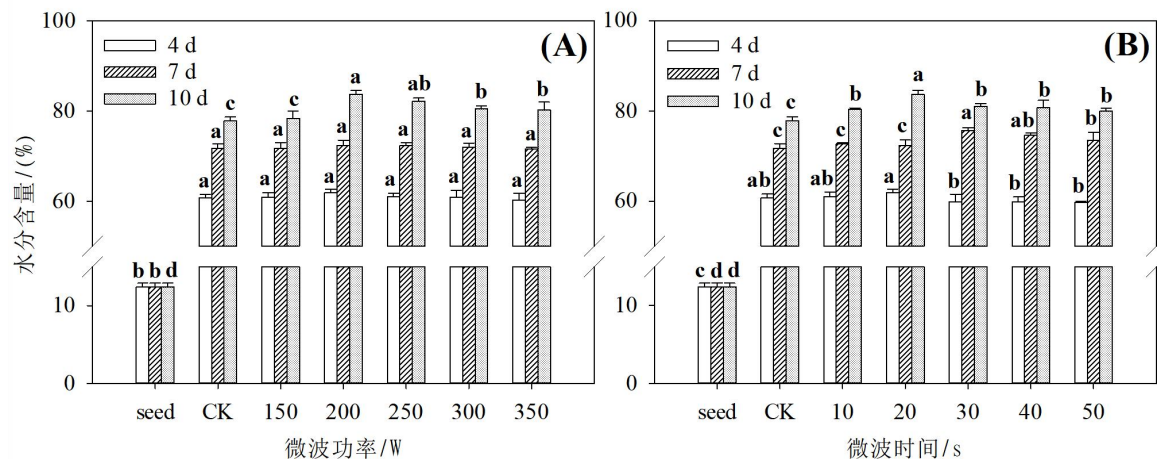


图 3-1 微波处理对发芽玉米中水分含量的影响

Fig.3-1 Effect of microwave treatment on moisture content of germinated maize

水分是植物的重要组成部分, 充足的水分可以帮助植物快速生长, 吸收养分^[88], 水分还可吸收植物自身产生的热量, 防止植物体内温度过高。如图 3-1 所示, 随着发芽时间的延长, 玉米的含水量显著增加 ($P < 0.05$)。研究表明^[89], 水还是营养物质的良好溶剂, 植物所需的营养物质不能被直接吸收和利用, 一些物质只有溶解后才能被吸收利用。缺乏水分会导致植物抵抗外界环境破坏的能力下降。微波处理能够显著提高

发芽玉米中的含水量 ($P<0.05$), 且在 200 W/20 s 的微波处理下, 发芽 10 d 后的玉米水分含量最高, 为 83.70%, 较 CK 提高 7.60%, 是种子的 6.74 倍。适度的微波处理使细胞的渗透压降低, 提高吸水能力, 进而提高发芽玉米中的水分含量, 促进其生长。

3.5.2 微波处理对发芽玉米淀粉含量的影响

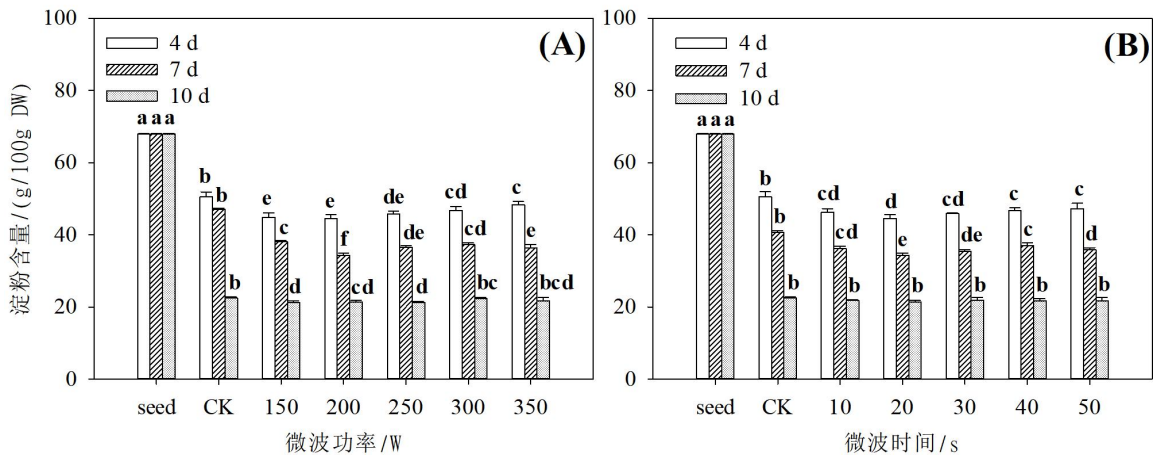


图 3-2 微波处理对发芽玉米中淀粉含量的影响

Fig.3-2 Effect of microwave treatment on starch content of germinated maize

淀粉储存在植物种子的胚乳中, 在萌发过程中为植物生长提供能量^[90]。如图 3-2 所示, 玉米种子中含有 67.96 g/100 g 的淀粉, 但随着发芽时间的延长 (0~10 d), 发芽玉米中的淀粉含量不断降低。随着微波功率/时间的增加, 发芽玉米中淀粉含量先降低后升高。在 200 W/20 s 的微波处理下, 4、7、10 d 的发芽玉米中淀粉含量分别比 CK 下降了 12.02%、15.46%和 4.50%, 且 10 d 的发芽玉米中淀粉含量仅为 21.45 g/100 g DW, 比种子减少了 68.44%。

3.5.3 微波处理对发芽玉米还原糖含量的影响

还原糖作为小分子供能物质, 更易被植物所利用。发芽玉米中还原糖含量随发芽时间的延长显著增加 (图 3-3), 增长趋势与淀粉含量变化相反, 说明淀粉在此期间不断被分解成小分子还原糖。微波处理后, 发芽玉米中还原糖含量显著提高, 且随着微波功率/时间的增加, 还原糖含量呈现先升高后降低的趋势。在 200 W 的微波功率下处理 20 s 后, 10 d 的发芽玉米还原糖含量为 17.73 g/100 g DW, 比 CK 提高了 6.04%, 是种子的 11.10 倍。

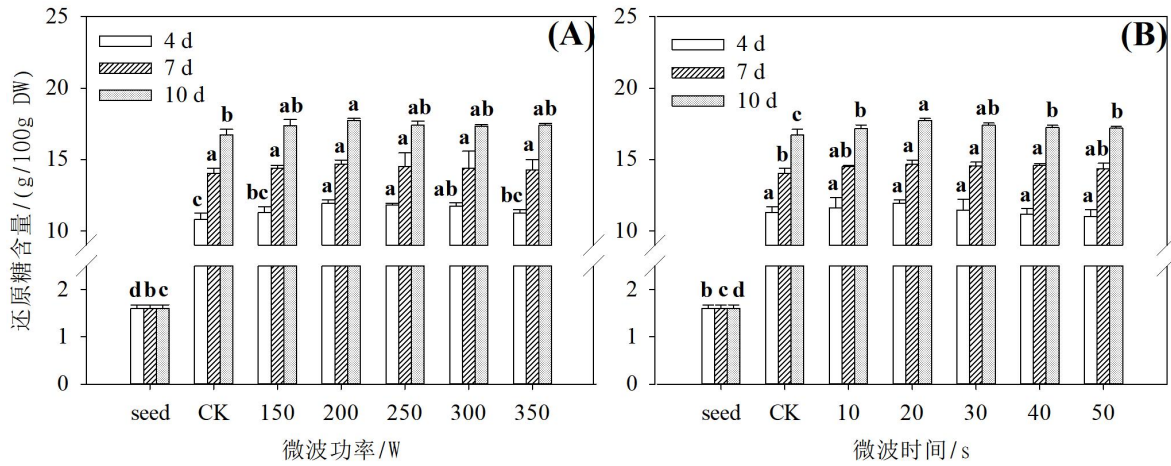


图 3-3 微波处理对发芽玉米中还原糖含量的影响

Fig.3-3 Effect of microwave treatment on reducing sugar content of germinated maize

3.5.4 微波处理对发芽玉米淀粉酶活性的影响

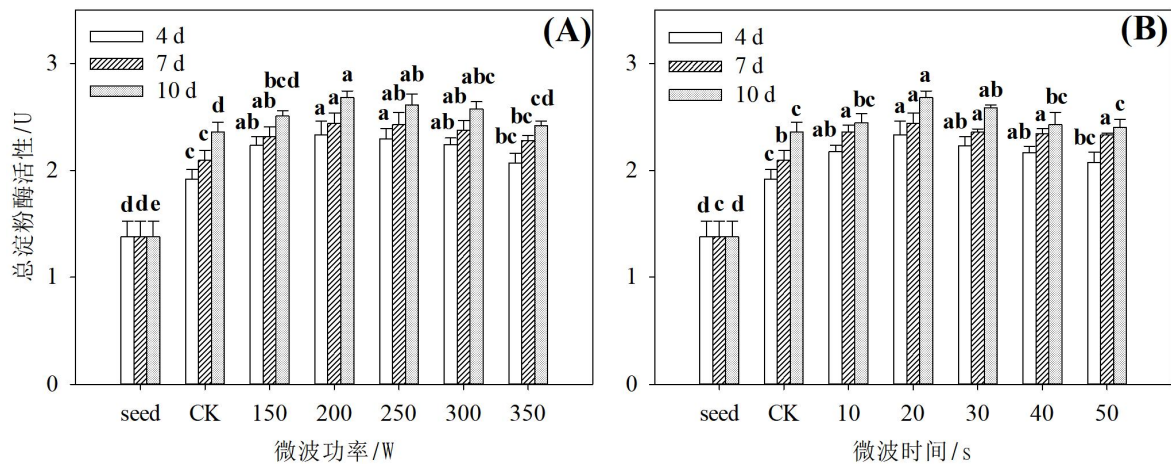


图 3-4 微波处理对发芽玉米中淀粉酶活性的影响

Fig.3-4 Effect of microwave treatment on amylase activity of germinated maize

淀粉酶是一种水解植物中淀粉和其他糖类的酶，其活性在谷物发芽后增加。在一定的发芽时间内（避光处理），玉米只能消耗胚乳中的有机物，所以淀粉含量持续下降，由于淀粉不能被植物吸收利用，所以在淀粉酶的催化下，淀粉水解成小分子还原糖，为种子萌发和幼苗生长发育提供所需的营养和能量^[44]。如图 3-4 所示，发芽玉米中淀粉酶的活性随着发芽天数的延长而增加，进而促进淀粉水解为葡萄糖和麦芽糖等小分子还原糖，为植物提供能量和营养。因此，淀粉含量大大降低，还原糖含量增加。微波处理能显著提高发芽玉米中淀粉酶的活性，且随着微波功率/时间的增加，淀粉酶活性先升高后降低。在 200 W/20 s 的微波处理下，发芽玉米 10 d 的淀粉酶活性（2.68 U）比 CK 提高了 13.56%，是种子的 1.96 倍。之前的研究表明^[64]，300 W/50 s 的微波

处理能使萌发 5 d 的苦荞芽淀粉酶活性提高 11.62%，并加速淀粉水解。适度的微波处理能让种子中淀粉酶活性升高，促进淀粉酶水解、还原糖含量提高，但随着微波功率的上升和微波时间的延长，种子吸收的电磁能过多，热效应增大，温度过高导致种子中淀粉酶活性降低，进而导致淀粉水解和还原糖含量降低。

3.5.5 微波处理对发芽玉米可溶性蛋白含量的影响

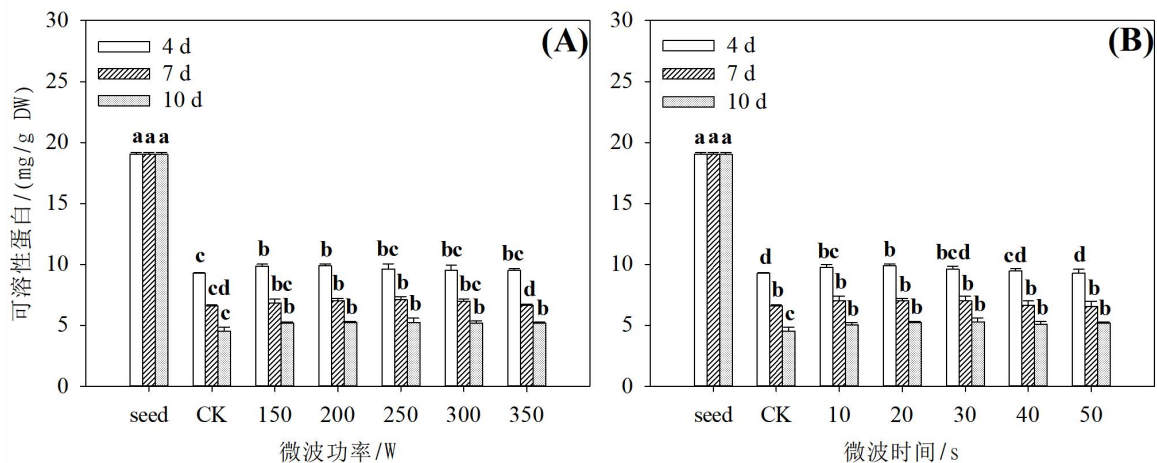


图 3-5 微波处理对发芽玉米中可溶性蛋白含量的影响

Fig.3-5 Effect of microwave treatment on soluble protein content of germinated maize

可溶性蛋白质是植物中的渗透调节物质和营养物质。当植物处于逆境中时，它们可以作为渗透调节物质显著增加和积累，提高细胞的持水能力，并保护细胞内的重要物质和细胞膜。因此，可溶性蛋白质的积累不仅是植物应激的标志，而且可以减轻对细胞的损伤^[91]。此外，可溶性蛋白质也是植物中某些酶的成分，决定了植物的整个代谢途径，因此对植物生长具有重要影响^[92]。如图 3-5 所示，随着发芽时间的延长，发芽玉米中的可溶性蛋白含量显著降低 ($P<0.05$)，发芽 10 d，CK 的可溶性蛋白比种子降低了 79.20%。玉米发芽时，需要消耗大量的营养物质和化学元素，氮元素 (N) 作为蛋白质中的一种特殊元素，也是控制种子发芽的关键因素之一。在这个过程中，蛋白质被分解小分子肽类物质，为发芽提供能量和 N 元素。尽管一些氨基酸在发芽过程中被脱水并再次合成蛋白质，但由于发芽的玉米无法通过光合作用获得能量，蛋白质被持续消耗而无法得到补充。在发芽期间 (4~10 d)，微波处理组的可溶性蛋白质含量显著高于 CK 组，表明玉米经微波处理后可产生大量蛋白质，抵抗细胞损伤，从而保证种子正常生长发育。发芽 10 d 后，200 W/20 s 处理组的可溶性蛋白含量最高，为

5.23 mg/g, 是 CK 的 1.15 倍。

3.5.6 微波处理对发芽玉米游离氨基酸含量的影响

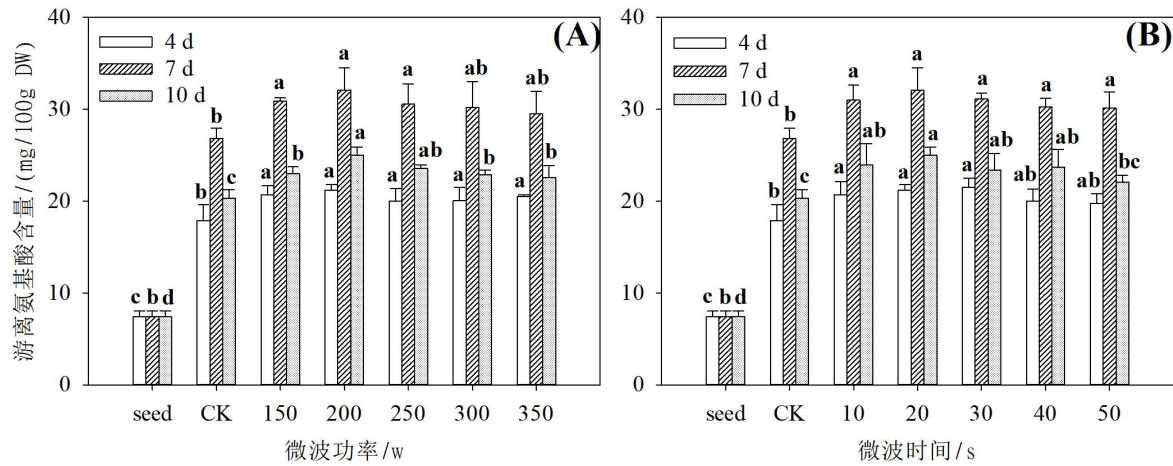


图 3-6 微波处理对发芽玉米中游离氨基酸含量的影响

Fig.3-6 Effect of microwave treatment on free amino acid content of germinated maize

氨基酸同时含有氨基和羧基，游离氨基酸一般是指尚未形成多肽的氨基酸。植物体内游离氨基酸具有提高抗逆性、促进生长发育、增产的作用^[93]。游离氨基酸含量随着发芽时间的延长呈先升高后降低的趋势（图 3-6）。在萌发过程中，各种水解酶的活性增强，蛋白质被分解成氨基酸和小分子肽，流向根和芽。其中一部分被细胞生长利用消耗，另一部分被重新合成为蛋白质^[82]。结果表明，微波处理能显著提高发芽玉米的游离氨基酸含量（ $P<0.05$ ）。在 200 W 的功率下微波处理 20 s，萌发 7 d 时，发芽玉米的游离氨基酸含量最高，为 32.09 mg/100g，比 CK 高 19.52%，是种子的 4.33 倍。Wang 等^[70]研究表明，200~600 W/10~30 s 的微波处理能显著提高苦荞芽中游离氨基酸含量。分析表明，适度的微波处理可能影响发芽玉米中氨基酸合成/分解相关的酶基因表达水平，增强内源蛋白酶的活性，促进大分子蛋白质水解成氨基酸，供给发芽玉米不同部位消耗和利用，显著促进其生长发育。

3.5.7 微波处理对发芽玉米粗脂肪含量的影响

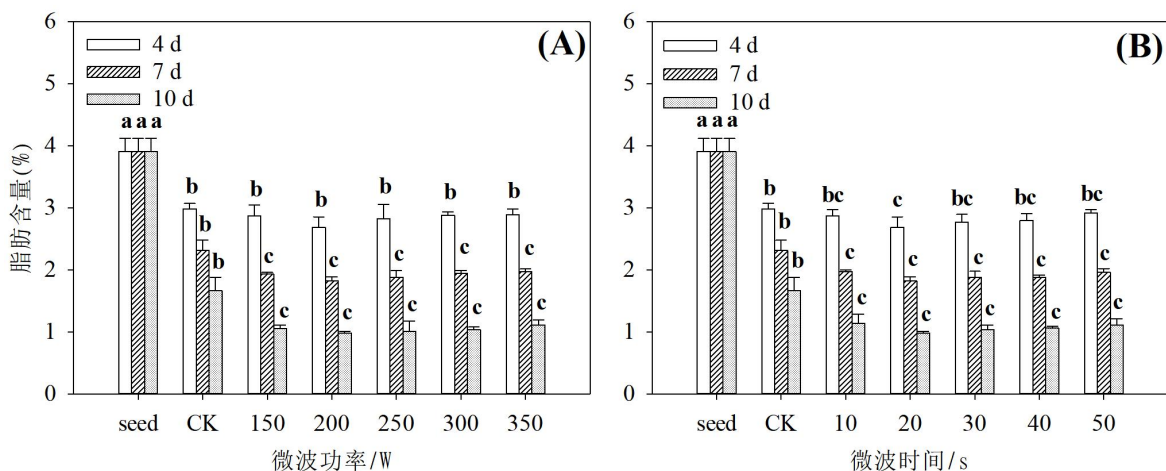


图 3-7 微波处理对发芽玉米中脂肪含量的影响

Fig.3-7 Effect of microwave treatment on fat content of germinated maize

作为主要的能量储备，脂肪在谷物种子中以甘油三酯（TG，triglyceride）的形式储存，TG 在发芽初期被分解成甘油和游离脂肪酸，这两种物质通过糖异生生成小分子葡萄糖，为玉米发芽提供能量^[82]。发芽玉米的脂肪含量如图 3-7 所示。玉米发芽时，脂肪含量大大减少。发芽 10 d 时，CK 的脂肪含量仅剩 1.67%，相比种子减少了 57.29%。此外，微波处理也能促进脂肪加速分解成小分子物质，但处理组之间的脂肪含量差异并不显著($P \geq 0.05$)。在 200 W/20 s 的微波处理下，发芽 10 d 的脂肪含量最低，为 0.99%，比 CK 减少了 40.72%。Karmakar 等^[39]也发现了类似的结果，即经过不同时间的等离子体处理过的玉米种子萌发后的脂肪含量没有显著差异。上述结果表明，不同处理对发芽玉米的脂肪含量的差异性没有影响。

3.6 本章小结

本章主要采用不同微波处理条件对玉米进行处理，研究微波处理对发芽玉米中主要营养成分的影响。结果表明，微波处理能显著提高发芽玉米中的水分含量，200 W/20 s 的微波处理后发芽 10 d 的玉米中水分含量最高，为 83.70%，较 CK 提高 7.60%，是种子的 6.74 倍。适度的微波处理能够提高发芽玉米中淀粉酶的活性，加速淀粉的分解，在 200 W 的微波功率下处理 20 s 后，发芽 10 d 的玉米淀粉酶活性比 CK 提高了 13.56%，是种子的 1.96 倍，淀粉含量比种子减少了 68.44%，比 CK 下降了 4.50%。适度的微波处理能提高发芽玉米中还原糖的含量，200 W/20 s 的微波处理后发芽 10 d 的玉米中还

原糖含量比 CK 提高了 6.04%，是种子的 11.08 倍。发芽玉米中可溶性蛋白含量随发芽逐渐减少，微波处理能够提高发芽玉米中可溶性蛋白的含量，但处理组之间的差异并不显著（ $P \geq 0.05$ ）。适度的微波处理可以提高发芽玉米中的游离氨基酸含量，提高发芽玉米的营养价值，且在 200 W 的功率下微波处理 20 s 后，7 d 的发芽玉米中游离氨基酸含量最高，为 32.09 mg/100g，比 CK 提高了 19.52%，是种子的 4.33 倍。微波处理能促进脂肪加速分解成小分子物质，但处理组之间的脂肪含量差异并不显著（ $P \geq 0.05$ ）。

第 4 章 微波处理对发芽玉米中活性成分富集的影响

4.1 引言

近年来,芽苗菜类食品已经被广泛研究,其因营养丰富,风味独特,清脆爽口,并具有特殊医疗保健功能而被大众所青睐。例如,西兰花芽因其含有的萝卜硫素而具有抗癌、抗菌、抗高血压和抗糖尿病等作用^[94];苦荞发芽后黄酮含量大大增加,对糖尿病有一定的防治效果^[95];花生芽内富含的白藜芦醇,具有抗癌、抗氧化等效果^[96]。由此可知,发芽可为植物积累大量的生物活性物质。玉米含有丰富的类胡萝卜素,其中 60%为叶黄素。作为视网膜黄斑色素中的主要成分,叶黄素可以吸收蓝光、中和 ROS,保护视网膜免受氧化损伤^[97, 98]。研究表明,叶黄素可改善老年黄斑变性^[99],治疗白内障,预防癌症和心血管疾病^[100],具有抗氧化作用^[101],还可作为天然着色剂为食品增加色泽。大量研究表明^[66, 102],玉米发芽后可富集叶黄素、玉米黄质和 α -隐黄质等类胡萝卜素。目前,微波多用于处理苦荞等谷物富集活性物质,且取得了一定的研究成果。汪建飞等^[103]的研究表明,在 300 W/75 s 的微波条件下,萌发 7 d 的苦荞芽中芦丁含量比 CK 高出 10.95%,是种子的 2.10 倍。但关于微波处理对发芽玉米富集活性物质影响的文献鲜少报道。

因此,本章采用不同的微波条件处理玉米种子,研究微波处理对玉米发芽后 MDA 的含量、活性成分(脯氨酸、总酚、抗坏血酸、叶黄素、总类胡萝卜素)的富集和 FTIR 的影响。

4.2 材料与设备

4.2.1 实验材料

郑单 958,购自河南大成种业有限公司,置于-4° C 冰箱进行储存。

4.2.2 实验试剂

表 4-1 实验试剂

Table 4-1 Experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
TCA	AR	国药集团化学试剂有限公司
TBA	AR	国药集团化学试剂有限公司
冰醋酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
福林酚试剂	AR	国药集团化学试剂有限公司
没食子酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
抗坏血酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
草酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
2, 6-二氯靛酚	AR	国药集团化学试剂有限公司
碳酸氢钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
β -胡萝卜素	AR	国药集团化学试剂有限公司
核黄素	AR	国药集团化学试剂有限公司

其他主要试剂同 2.2.2 和 3.2.2。

4.2.3 实验仪器

表 4-2 实验仪器

Table 4-2 Experimental equipment

仪器名称	型号	厂家
冷冻离心机	CF15RN	广州硕谱生物科技有限公司
液晶超声清洗器	KS-500DE	昆山洁力美超声仪器有限公司
傅里叶红外光谱仪	IR Prestige-21	日本岛津公司

其他主要仪器同 2.2.3 和 3.2.3。

4.3 实验方法

4.3.1 玉米发芽试验

玉米发芽试验及微波处理方法同 2.3.1。

4.3.2 发芽玉米样品的制备

发芽玉米样品的制备方法同 3.3.1。

4.3.3 MDA 含量的测定

MDA 含量的测定参考 Toscano 等^[104]的方法, 并进行修改。向研钵中依次加入 2 g 发芽玉米、10 mL 预冷的 10%TCA 溶液, 在冰浴中研磨匀浆, 离心 20 min(4°C, 10000×g)

后，收集上清液低温储存。向试管中依次加入 2 mL 样品液、2 mL 0.67%TBA 溶液，而后沸水浴加热 30 min，冷却后离心 10 min (5000×g)，取上清测定 450、532、600 nm 处的 OD 值。空白管中用 2 mL 10%TCA 代替。MDA 含量计算公式如式 4-1、式 4-2 所示。

$$C(\mu\text{mol/L})=6.45\times(\text{OD}_{532}-\text{OD}_{600})-0.56\times\text{OD}_{450} \quad (\text{式 4-1})$$

$$\text{MDA}(\text{nmol/g FW})=\frac{C\times V}{V_1\times m} \quad (\text{式 4-2})$$

式中：C—MDA 的浓度， $\mu\text{mol/L}$ ；

V—提取溶液的体积，mL；

V_1 —测量过程中采集的样品体积，mL；

m—样品质量，g。

4.3.4 脯氨酸含量的测定

参考 Dadach^[105]等的研究方法，并进行修改。向 0.5 g 发芽玉米粉中加入 5 mL 去离子水，混匀后沸水浴加热 30 min，冷却后离心 (10000×g, 15 min)。依次向试管中加入 1 mL 上清、1 mL 冰醋酸、2 mL 酸性茚三酮试剂和 3 mL 甲苯，混合后在 520 nm 处测定 OD 值。脯氨酸标准曲线为 $y=0.0174x-0.0062$ ， $R^2=0.9994$ 。

4.3.5 总酚含量的测定

参考汪建飞^[103]的方法提取并测定总酚含量。向离心管中依次加入 0.5 g 发芽玉米粉、4 mL 70%乙醇，超声提取 30 min 后离心，重复上述操作，合并提取液。向 10 mL 容量瓶中依次加入 0.1 mL 提取液、1 mL 福林酚试剂、1 mL 7.5% Na_2CO_3 ，并用去离子水定容。混匀后静置 30 min 后在 765 nm 处测定 OD 值。结果以没食子酸当量表示 (mg GAE/g)，标准曲线为 $y=0.0958x+0.0017$ ， $R^2=0.9994$ 。

4.3.6 VC 含量的测定

根据 GB 5009.86-2016^[106]测定 VC 含量。称取 1.0 g 发芽玉米粉于容量瓶中，用草酸溶液定容至 50 mL，浸提后过滤。用 DCPIP 溶液滴定样品液，至溶液变成粉红色 15 s 不褪色，空白组用等体积草酸溶液代替。VC 含量计算公式如式 4-3 所示。

$$X = \frac{(V-V_0) \times T \times A}{m} \times 100 \quad (\text{式 4-3})$$

式中：X—VC 含量，mg/100g；

V—滴定样品所消耗的 DCPIP 溶液体积，mL；

V₀—滴定空白所消耗的 DCPIP 溶液体积，mL；

T—DCPIP 溶液的滴定度，mg/ mL；

A—稀释倍数；

m—样品质量，g。

4.3.7 叶黄素含量的测定

叶黄素含量的测定同 2.3.7。

4.3.8 总类胡萝卜素含量的测定

类胡萝卜素的提取和测定参考包怡红等^[54]的方法。标准曲线为 $y=0.1398x-0.0032$ ， $R^2=0.9995$ ，结果以β-胡萝卜素当量表示（μg/g DW）。

4.3.9 FTIR 的测定

将玉米种子和发芽玉米冷冻干燥，研磨过筛后备用。称取 1 mg 样品与适量 KBr 混合研磨压成薄片。设定红外光谱扫描波长为 4000~400 cm⁻¹，扫描次数为 20 次，分辨率为 2 cm⁻¹。

4.4 数据统计与分析

数据统计与分析同 2.4。

4.5 结果与分析

4.5.1 微波处理对发芽玉米 MDA 含量的影响

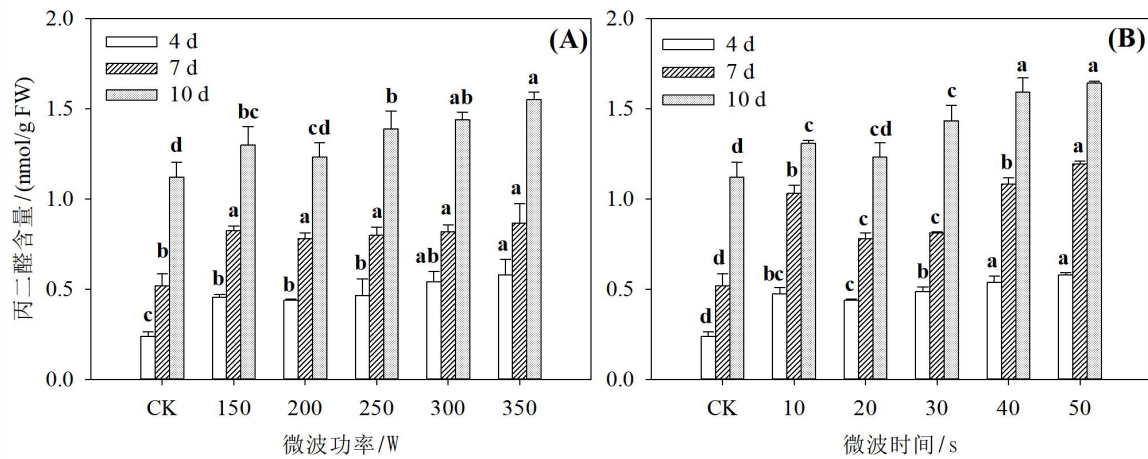


图 4-1 微波处理对发芽玉米中 MDA 含量的影响

Fig.4-1 Effect of microwave treatment on malondialdehyde content of germinated maize

MDA 的过量累积会造成蛋白质、核酸等大分子的交联聚合，导致细胞膜的结构和功能发生改变。而 MDA 产生的原因是植物遭受逆境胁迫后，大量的自由基生成并引起膜脂质发生过氧化反应。因此，通常通过测定 MDA 的含量来反映植物受逆境迫害的程度。随着发芽天数的延长，发芽玉米中 MDA 含量逐渐增加，发芽 10 天后达到最大值（图 4-1）。这是因为在种子发芽过程中，细胞呼吸强度增加，代谢增强，ROS 迅速积累，造成细胞膜脂质过氧化反应，产生过量的 MDA。微波处理显著提高了发芽玉米中 MDA 含量，随着微波功率/时间的增加，MDA 含量呈现先降低后增加的趋势。在 200 W/20 s 的微波处理下，第 10 d 的 MDA 含量仅为 1.23 nmol/g FW，比 CK 高 9.82%；而在 200 W/50 s 的微波下，第 10 d 的 MDA 含量达到 1.64 nmol/g FW，是 CK 的 1.46 倍。这表明，微波处理对玉米种子是一种逆境胁迫，植物在此状态会产生不利于自身生长发育的 ROS，所以玉米受到微波处理后会产生活性成分保护自身，所以有必要测定微波处理后的发芽玉米中活性成分的含量。

4.5.2 微波处理对发芽玉米中脯氨酸含量的影响

作为植物蛋白的主要成分，脯氨酸广泛存在于植物中^[107]。脯氨酸在植物中的含量通常很低，但在不利的情况下会大量积累。积累的脯氨酸不仅是植物细胞质的渗透调

节剂外，还可以作为细胞膜蛋白质和酶的保护材料以及自由基清除剂，稳定生物大分子的结构，从而提高植物抗逆境的能力。因此，植物抗逆性的强弱也跟脯氨酸含量相关。如图 4-2 所示，发芽能显著提高玉米脯氨酸的含量，并且随着发芽时间的延长，脯氨酸的含量持续增加。Choudhury 等^[108]的研究表明，脯氨酸可通过诱导线粒体自噬，增强线粒体清除率，恢复细胞清除代谢并减轻各种与衰老相关的特征。随着微波功率/时间的增加，脯氨酸的含量也呈现出先增加后减少的趋势。在 200 W/20 s 的微波处理下，10 d 的脯氨酸含量最高，为 70.72 $\mu\text{g/g}$ ，比 CK 增加 15.48%，是种子的 21.68 倍。结果表明，生长和微波处理均能提高发芽玉米中脯氨酸的含量，以此消除衰老和逆境带来的不可逆伤害。

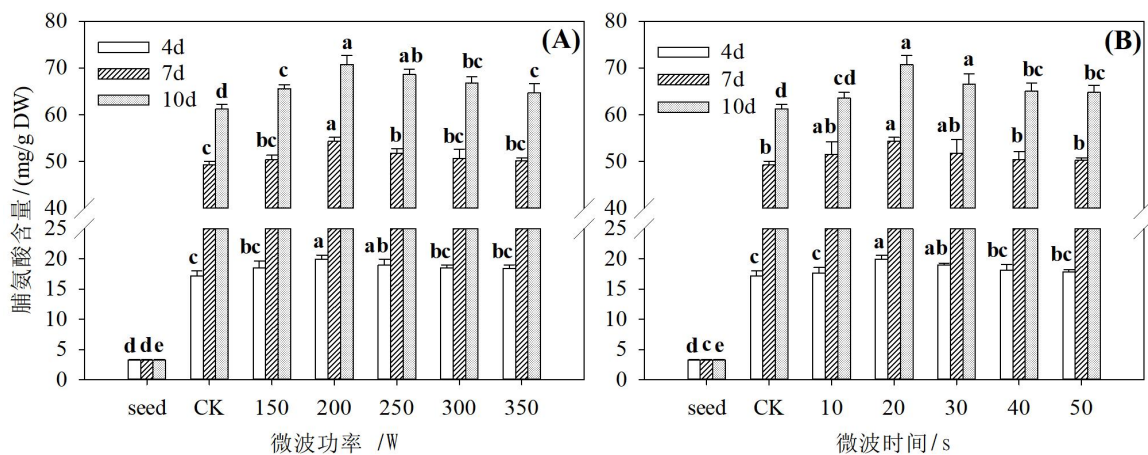


图 4-2 微波处理对发芽玉米中脯氨酸含量的影响

Fig.4-2 Effect of microwave treatment on proline content of germinated maize

4.5.3 微波处理对发芽玉米总酚含量的影响

作为植物中的次级代谢物，酚类物质具有抗氧化、抗炎和抗癌等生物活性^[109]。酚类化合物是植物中最重要的抗氧化活性成分之一，它们的含量的多少体现了植物抗氧化能力的强弱。植物受到逆境胁迫时，组织迅速产生响应，激活细胞中防御体系关键基因的转录和表达，合成防御酶系统^[110]，而且还会启动次生代谢途径合成次级代谢物，增强机体抵御逆境的能力^[111]。图 4-3 表明，发芽能够显著提高玉米中的总酚含量，且含量随着发芽时间的延长而降低，且 10 d 的发芽玉米中总酚含量仍高于种子的总酚含量。随着微波时间/功率的增加，发芽玉米中总酚含量呈现先上升后下降。在 250 W 的功率下处理 20 s，4 d 的发芽玉米中总酚含量最高，为 4.27 mg/g，比 CK 增加了 46.05%，

是种子的 1.98 倍。

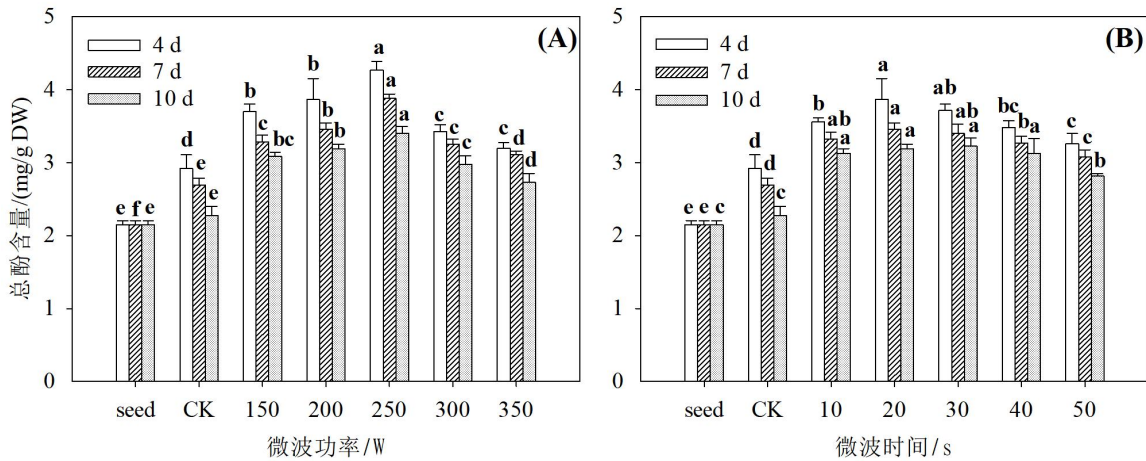


图 4-3 微波处理对发芽玉米总酚含量的影响

Fig.4-3 Effect of microwave treatment on phenolics content of germinated maize

4.5.4 微波处理对发芽 VC 含量的影响

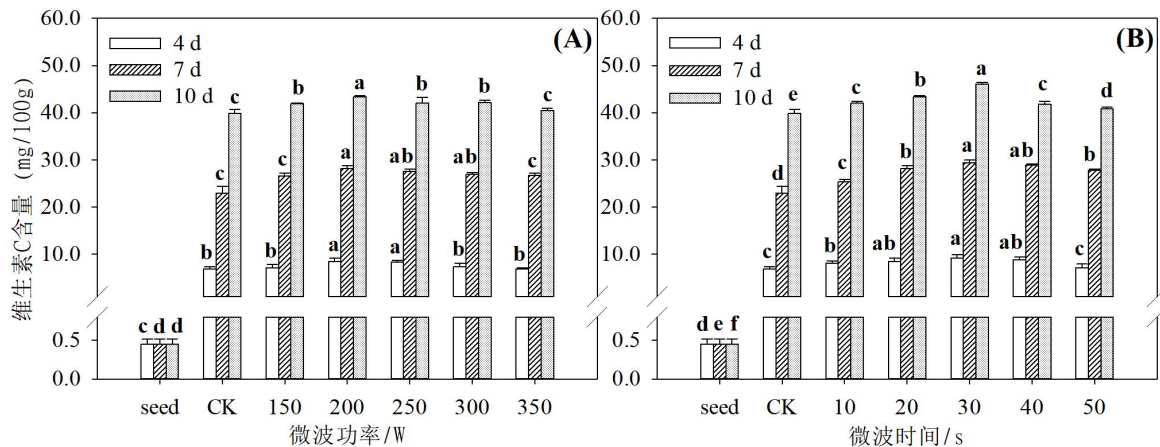
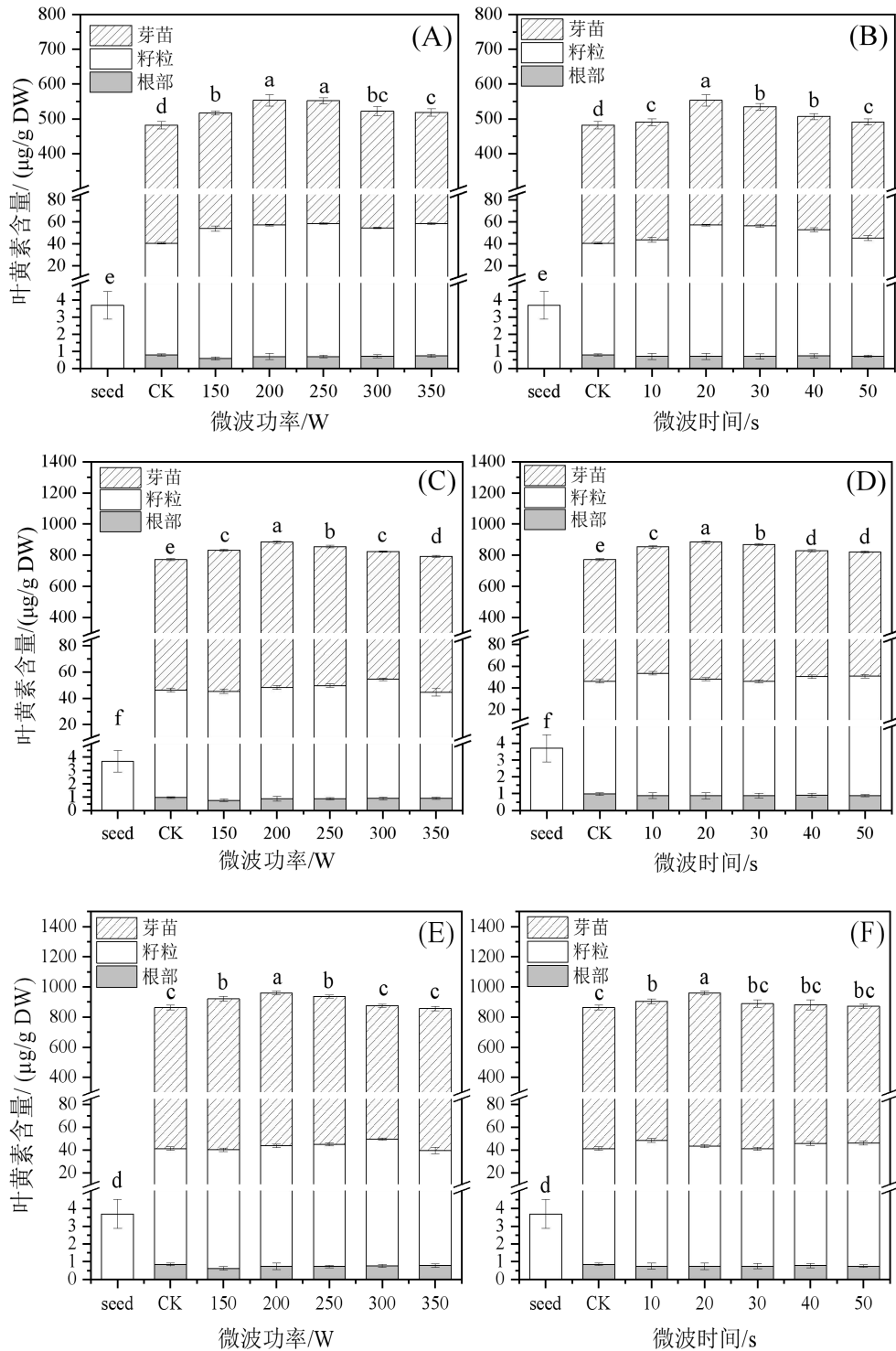


图 4-4 微波处理对发芽玉米 VC 含量的影响

Fig.4-4 Effect of microwave treatment on Vitamin C content of germinated maize

如图 4-4 所示发芽能显著提高玉米种子中的 VC 含量，且随着发芽时间的延长，VC 含量一直升高。发芽期间，参与 VC 合成代谢的酶类活性得到增强，所以发芽玉米中的 VC 含量持续增加。已有研究表明^[112]，大豆在萌发期间 VC 含量呈上升趋势，且发芽的 3~5 d 内的 VC 含量增长幅度最大。微波处理能够显著提高发芽玉米 VC 含量 ($P<0.05$)，且在 200 W/30 s 的处理下，10 d 的发芽玉米的 VC 含量最高，为 46.04 mg/100 g，比 CK 增加 15.52%，是种子的 103.23 倍。赵萌萌等^[113]的研究表明，经过 915 MHz/30 s 的微波处理后，5 d 的绿豆芽中 VC 含量可达 200 $\mu\text{g/g}$ ，这表明微波处理是一种能够提高种子萌发后营养品质的简单方法。

4.5.5 微波处理对发芽玉米不同部位叶黄素含量的影响



注：A 和 B：发芽 4 d；C 和 D：发芽 7 d；E 和 F：发芽 10 d；A、C 和 E：微波功率 200 W；B、D 和 F：微波时间 20 s

图 4-5 微波处理对发芽玉米不同部位叶黄素含量的影响

Note: A and B: germination for 4 d; C and D: germination for 7 d; E and F: germinated for 10 d; A, C and E: Microwave power 200 W; B, D and F: Microwave time 20 s

Fig.4-5 Effect of microwave treatment on lutein content in different parts of germinated maize

由图 4-5 可知，玉米种子中的叶黄素含量仅有 $3.69 \mu\text{g/g}$ ，且发芽期间（4~10 d），玉米中的叶黄素含量随着时间的延长显著提高($P<0.05$)，其中芽苗中叶黄素含量最高，籽粒次之，根部最少。CK 组 4、7、10 d 的玉米芽苗中叶黄素含量分别为 441.47、726.51、822.25 $\mu\text{g/g}$ 。包怡红等^[54]的研究也证明了玉米不同部位的叶黄素含量差异显著，胚芽含量最高可达 35.08 $\mu\text{g/g}$ 。广义的叶黄素是指叶黄素类（xanthophyll），包括叶黄素（lutein）、玉米黄质（zeaxanthin）和内旋玉米黄质（mesozeaxanthin）等，并且它们能互相转化并以一定的比例共存^[114]。

植物叶黄素的合成主要通过类异戊二烯途径，其中涉及多种生化反应的关键酶，比如 PSY、 ϵ -LCY 和 β -OHase 等，这类酶在萌发初期活性很低，但随着时间的推移，酶活性增强且达到最高，而后缓慢下降，与玉米芽苗中叶黄素的增加量先上升后下降的趋势相对应。微波处理能显著提高发芽玉米的叶黄素含量 ($P<0.05$)，在 200 W/20 s 的处理下，10 d 的根部、籽粒和芽苗的含量分别为 0.73、43.02 和 917.06 $\mu\text{g/g}$ ，其中籽粒和芽苗的含量分别比 CK 组提高了 6.14%和 11.53%，根部比 CK 组降低了 12.46%。适度的微波处理能提高玉米中叶黄素合成关键酶的活性，加强叶黄素的合成，过度的微波处理会降低发芽玉米中叶黄素合成关键酶的活性，甚至使其失活，叶黄素合成效率随之降低。

4.5.6 微波处理对发芽玉米类胡萝卜素含量的影响

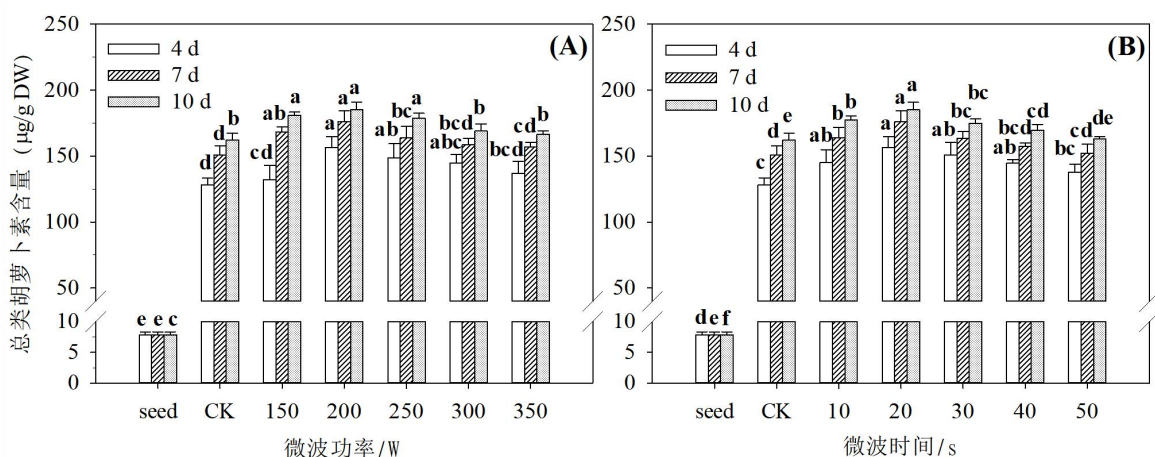


图 4-6 微波处理对发芽玉米类胡萝卜素含量的影响

Fig.4-6 Effect of microwave treatment on carotenoids content of germinated maize

微波处理对发芽玉米类胡萝卜素含量的影响如图 4-6 所示，与叶黄素含量的变化

情况相似，类胡萝卜素含量在发芽期间持续增加，且 4~7 d 的增加量高于 7~10 d 的增加量。10 d 时，CK 组发芽玉米的类胡萝卜素含量达到 $162.04 \mu\text{g/g}$ ，是种子的 20.62 倍。微波处理能显著提高发芽玉米的类胡萝卜素含量，且经过 200 W/20 s 的微波处理后，4、7、10 d 的类胡萝卜素含量分别为 156.66、175.93、 $184.99 \mu\text{g/g}$ ，分别比 CK 提高了 22.30%、16.57%、14.16%。

4.5.7 微波处理对发芽玉米 FTIR 的影响

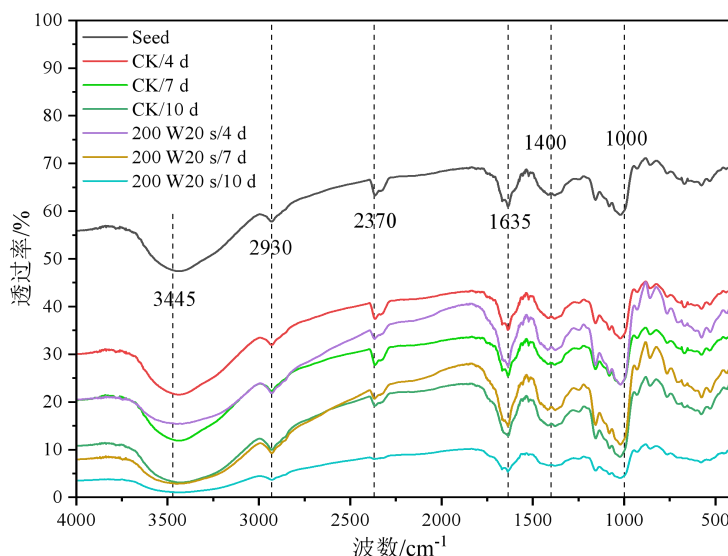


图 4-7 微波处理对发芽玉米红外光谱的影响

Fig.4-7 Effect of microwave treatment on infrared spectrum of germinated maize

图 4-7 为玉米种子发芽不同天数的红外光谱图，每组样品的光谱相似，并没有产生新的物质，但是某些特征峰的吸收强度有所变化。随着萌发天数的增加， 3445 cm^{-1} 附近的吸收带变的更强且宽，是典型的一OH 伸缩振动信号，这与玉米发芽过程中淀粉被水解，糖苷键断裂，产生了较多的氢键有关； 2930 cm^{-1} 处对应了一CH 键的伸缩振动； 2370 cm^{-1} 附近是一C=C—双键的伸缩振动峰； 1635 cm^{-1} 处的吸收峰为共轭多烯中 C=C 的伸缩振动峰； 1400 cm^{-1} 附近的吸收峰对应了一CH₃（甲基）面内变形振动； 1000 cm^{-1} 附近的吸收峰为一CH=CH—（烯烃）面外弯曲振动峰，表明分子中含有较多的共轭烯烃结构^[115]。结合图 4-8 中几种主要的类胡萝卜素，以上的吸收峰与它们的结构相符合^[115, 116]，且 200 W 的微波处理 20 s 后，4、7、10 d 的发芽玉米红外光谱的吸收峰均强于 CK 组和玉米种子，说明发芽和适度的微波处理均能显著提高玉米中类

胡萝卜素的含量。

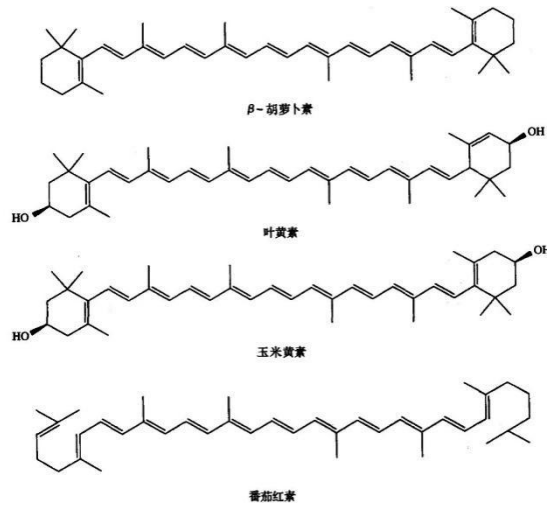


图 4-8 主要类胡萝卜素的分子结构

Fig.4-8 The molecular structure of major carotenoids

4.6 本章小结

本章主要采用不同微波处理条件对玉米进行处理,研究微波处理对发芽玉米 MDA、主要活性成分影响,并测定其红外光谱解释活性成分变化的具体原因。结果表明,微波处理能显著提高发芽玉米中的 MDA 含量,使得发芽玉米迅速在体内合成大量活性物质清除因逆境胁迫产生过量的自由基,且在 200 W/20 s 的微波处理下,第 10 d 的 MDA 含量仅为 1.23 nmol/g FW,比 CK 高 9.82%。适度的微波处理能够提高发芽玉米内各合成代谢酶的活性,提高各类活性成分的含量。在 200 W/20 s 的微波处理下,10 d 的脯氨酸含量最高,为 70.72 $\mu\text{g/g}$,比 CK 增加 15.48%,是种子的 21.68 倍。在 250 W 的功率下微波处理 20 s,4 d 的发芽玉米中总酚含量最高,为 4.27 mg/g,比 CK 增加了 46.05%,是种子的 1.98 倍。在 200 W/30 s 的处理下,10 d 的发芽玉米的 VC 含量最高,为 46.04 mg/100 g,比 CK 增加 15.52%,是种子的 103.23 倍。微波处理能显著提高发芽玉米的类胡萝卜素含量,且经过 200 W/20 s 的微波处理后,4、7、10 d 的类胡萝卜素含量分别为 156.66、175.93、184.99 $\mu\text{g/g}$,分别比 CK 提高了 22.30%、16.57%、14.16%。在 200 W/20 s 的微波处理下,10 d 的发芽玉米的根部、籽粒和芽苗的叶黄素含量分别为 0.73、43.02 和 917.06 $\mu\text{g/g}$,其中籽粒和芽苗的含量分别比 CK 组提高了 6.14%和 11.53%,根部比 CK 组降低了 12.46%。红外光谱分析表明,微波处理能提高

发芽玉米中类胡萝卜素特征峰的吸收强度，发芽和微波处理均能提高玉米中类胡萝卜素的含量。

第 5 章 微波处理对发芽玉米抗氧化能力的影响

5.1 引言

自由基是生物体进行细胞呼吸时的产物，具有强烈的氧化作用，过量聚集会导致细胞内的遗传物质变形，破坏细胞的结构和功能^[117]。由于环境污染和不健康的生活方式，人体会产生过量的自由基破坏自身的氧化还原系统，并造成衰老和癌症^[118]。研究表明，人体可通过补充抗氧化剂有效抑制体内过量的自由基，达到预防疾病和保持健康的作用^[119]。植物体内含有多种清除 ROS 和自由基的酶，比如 SOD、POD 和 CAT 等^[120]。研究表明，玉米发芽后的抗氧化酶的活性大大增强^[121]。我们之前的研究已经证明微波能够显著提高萌发苦荞的抗氧化能力和抗氧化酶活性^[103]。然而，微波处理对发芽玉米自由基清除能力和抗氧化酶活性的研究仍然有限。

因此，本章采用不同的微波条件处理玉米种子，研究微波处理对玉米发芽后的抗氧化酶（SOD、POD、CAT）活性及抗氧化能力（DPPH 和 ABTS 的自由基清除能力、FRAP）的影响，为开发发芽玉米类抗氧化剂提供理论依据。

5.2 材料与设备

5.2.1 实验材料

郑单 958，购自河南大成种业有限公司，置于-4° C 冰箱进行储存。

5.2.2 实验试剂

表 5-1 实验试剂

Table 5-1 Experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
Trolox	AR	国药集团化学试剂有限公司
ABTS 试剂	AR	国药集团化学试剂有限公司
DPPH 试剂	AR	国药集团化学试剂有限公司
2, 5, 6-三吡啶基三嗪	AR	国药集团化学试剂有限公司
过硫酸钾	AR	国药集团化学试剂有限公司
无水乙酸钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
三氯化铁	AR	国药集团化学试剂有限公司

聚乙二醇 6000	AR	国药集团化学试剂有限公司
聚乙烯吡咯烷酮	AR	国药集团化学试剂有限公司
曲拉通 X-100	AR	国药集团化学试剂有限公司
愈创木酚	AR	国药集团化学试剂有限公司
过氧化氢	AR	国药集团化学试剂有限公司
磷酸二氢钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
磷酸氢二钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
1, 5-二硫苏糖醇	AR	国药集团化学试剂有限公司
L-甲硫氨酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
氮蓝四唑	AR	国药集团化学试剂有限公司
乙二醇四乙酸二钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
核黄素	AR	国药集团化学试剂有限公司

其他主要试剂同 2.2.2、3.2.2 和 4.2.2。

5.2.3 实验仪器

表 5-2 实验仪器

Table 5-2 Experimental equipment

仪器名称	型号	厂家
冷冻离心机	CF15RN	广州硕谱生物科技有限公司
紫外分光光度计	UV-5800	上海元析有限公司

其他主要仪器同 2.2.3、3.2.3 和 4.2.3。

5.3 实验方法

5.3.1 玉米发芽试验

玉米发芽试验及微波处理方法同 2.3.1。

5.3.2 发芽玉米样品的制备

发芽玉米样品的制备方法同 3.3.1。

5.3.3 DPPH 自由基清除能力的测定

参考 Bian^[122]等的方法测定 DPPH 自由基清除能力,标准曲线为 $y=0.0749x+1.2112$, $R^2=0.9989$ 。结果以每克发芽玉米粉所含 Trolox 当量 ($\mu\text{mol TE/g}$) 表示。

5.3.4 ABTS 自由基清除能力的测定

参考 Wang^[123]等的方法测定 ABTS 自由基清除能力,标准曲线为 $y=0.1278x+6.8593$,

$R^2=0.9981$ 。结果以每克发芽玉米粉所含 Trolox 当量 ($\mu\text{mol TE/g}$) 表示。

5.3.5 FRAP 的测定

参考 Wang^[123] 等的方法测定 FRAP，标准曲线为 $y=0.0013x+0.0325$ ， $R^2=0.9961$ 。结果以每克发芽玉米粉所含 Trolox 当量 ($\mu\text{mol TE/g}$) 表示。

5.3.6 SOD 活性测定

参考杨焱^[124] 等的方法，并进行修改。向发芽玉米（鲜样）加入预冷的磷酸缓冲液，研磨匀浆后离心 30 min (4°C ， $12000\times g$)，上清低温保存备用。

酶促反应步骤：按表 5-3 依次加入试剂，一支空白管避光处理，另一只空白管和测定管在日光灯下反应 15 min 后终止反应。

以避光处理的空白管做空白调零，在 560 nm 处测定 OD 值。SOD 的活性单位 (U) 定义为每克样品每分钟抑制 50% 的 NBT 光华还原，计算公式如式 5-1 所示。

$$\text{SOD 活性(U)} = \frac{(A_C - A_S) \times V_0}{0.5 \times A_C \times V_S \times t \times m} \quad (\text{式 5-1})$$

式中： A_C —空白管的 OD 值；

A_S —测定管的 OD 值；

V_0 —样品提取液体积，mL；

V_S —测定时的样品液体积，mL；

t —反应时间，min。

m —样品鲜重，g。

表 5-3 测定 SOD 活性时各试剂的加入量

Table 5-3 The amount of each reagent added for measuring SOD activity

试剂（酶）	用量（mL）	终浓度（比色时）
50 mmol/L 磷酸缓冲液	1.7	
130 mmol/L MET 溶液	0.3	13 mmol/L
750 $\mu\text{mol/L}$ NBT 溶液	0.3	75 $\mu\text{mol/L}$
100 $\mu\text{mol/L}$ EDTA- Na_2 溶液	0.3	10 $\mu\text{mol/L}$
20 $\mu\text{mol/L}$ 核黄素溶液	0.3	2 $\mu\text{mol/L}$
酶液	0.1	空白管以缓冲液代替
总体积	3.0	

5.3.7 POD 活性测定

参考 Al-Madhagi^[125]等的方法，并进行修改。向发芽玉米（鲜样）加入预冷的醋酸缓冲液，研磨匀浆后离心 30 min（4℃，12000×g），上清低温保存备用。

酶促反应步骤：依次向试管中加入 3 mL 愈创木酚溶液，200 μL 的 H₂O₂ 溶液和 100 μL 的酶液，摇匀后在 470 nm 处测定 OD 值，每隔 1 min 记录一次数据，至少记录 6 个点。

POD 的活性单位（U）定义为每克样品每分钟 OD 值增加 1，计算公式如式 5-2 所示。

$$\text{POD 活性(U)} = \frac{\Delta\text{OD}_{470} \times V_0}{\Delta t \times V_S \times m} \quad (\text{式 5-2})$$

式中：ΔOD₄₇₀—反应混合液的 OD 值变化值；

V₀—样品提取液体积，mL；

V_S—测定时的样品液体积，mL；

Δt—酶促反应时间，min。

m—样品鲜重，g。

5.3.8 CAT 活性测定

参考 Wang^[126]等的方法，并进行修改。向发芽玉米（鲜样）加入预冷的磷酸缓冲液，研磨匀浆后离心 30 min（4℃，12000×g），上清低温保存备用。

酶促反应步骤：依次向试管中加入 2.9 mL 的 H₂O₂ 溶液和 100 μL 的酶液，摇匀后在 240 nm 处测定 OD 值，每隔 30 s 记录一次数据，至少记录 6 个点。

CAT 的活性单位（U）定义为每克样品每分钟 OD 值增加 0.01，计算公式如式 5-3 所示。

$$\text{CAT 活性(U)} = \frac{\Delta\text{OD}_{240} \times V_0}{0.01 \times \Delta t \times V_S \times m} \quad (\text{式 5-3})$$

式中：ΔOD₂₄₀—反应混合液的 OD 值变化值；

V₀—样品提取液体积，mL；

V_S—测定时的样品液体积，mL；

Δt—酶促反应时间，min。

m—样品鲜重，g。

5.4 数据统计与分析

数据统计与分析同 2.4。

5.5 结果与分析

5.5.1 微波处理对发芽玉米 DPPH 自由基清除能力的影响

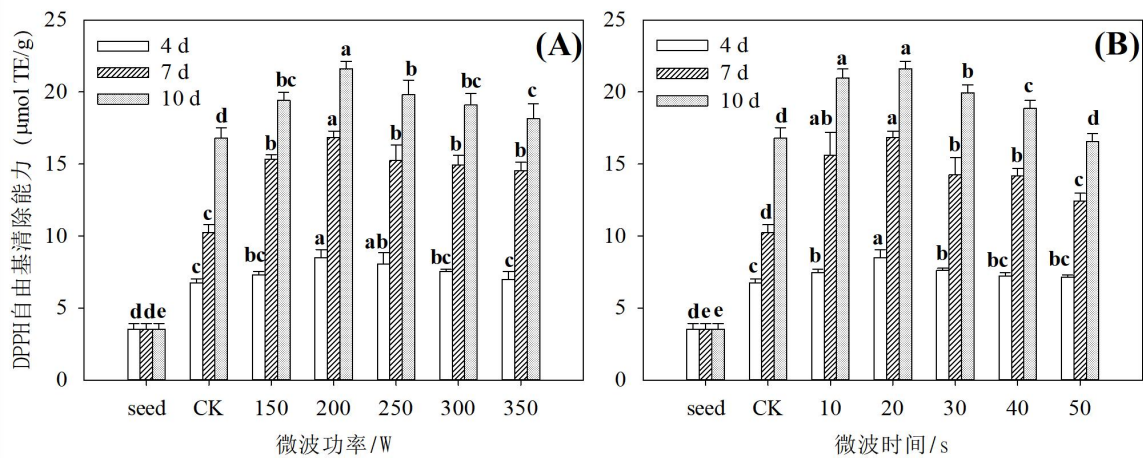


图 5-1 微波处理对发芽玉米 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig.5-1 Effect of microwave treatment on DPPH free radical scavenging ability of germinated maize

由图 5-1 可知，玉米种子清除 DPPH 自由基的能力为 $3.54 \mu\text{mol TE/g}$ ，发芽玉米对 DPPH 自由基的清除能力随发芽时间的延长逐渐升高，但上升趋势逐渐变缓。微波功率 200 W 下处理 20 s 后，10 d 的发芽玉米清除 DPPH 自由基的能力最大，为 $21.62 \mu\text{mol TE/g}$ ，比 CK 提高了 28.81%，是种子的 6.11 倍，而经过 200 W/50 s 的处理，10 d 发芽玉米清除 DPPH 自由基的能力甚至低于 CK。之前的研究^[117]也报道了相似的结果，在 300 W 的微波功率下处理 50 s，苦荞萌发 5 d 后提取的蛋白对 DPPH 自由基的清除能力显著高于 CK 组，而处理 110 s 后，苦荞萌发 3 d 后提取的蛋白清除 DPPH 自由基的能力却低于 CK 组。

5.5.2 微波处理对发芽玉米 ABTS 自由基清除能力的影响

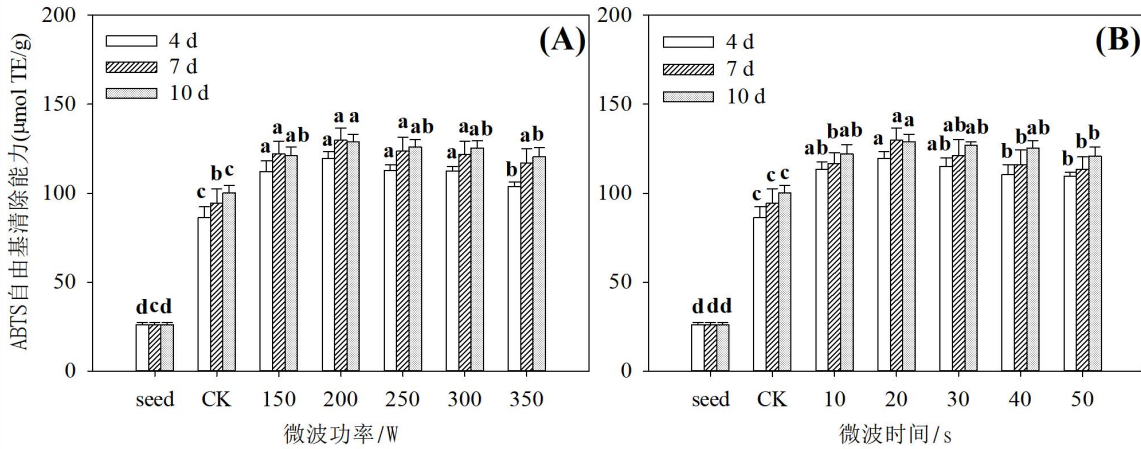


图 5-2 微波处理对发芽玉米 ABTS 自由基清除能力的影响

Fig.5-1 Effect of microwave treatment on ABTS free radical scavenging ability of germinated maize

由图 5-2 可知，玉米种子清除 ABTS 自由基的能力为 26.13 μmol TE/g，发芽玉米对 ABTS 自由基清除能力随发芽时间的延长呈现上升的趋势，但在 150 W 和 200 W 的微波处理下，10 d 的发芽玉米对 ABTS 自由基清除能力却略微下降。微波处理能显著提高发芽玉米清除 ABTS 自由基的能力，但处理组之间的清除能力差异并不显著 ($P \geq 0.05$)。微波功率 200 W 下处理 20 s 后，7 d 的发芽玉米清除 ABTS 自由基的能力最大，为 129.75 μmol TE/g，比 CK 提高了 37.67%，是种子的 4.97 倍。分析说明发芽能提高玉米清除 ABTS 自由基的能力，结合适度的微波处理更能显著提高发芽玉米对 ABTS 自由基的清除能力。

5.5.3 微波处理对发芽玉米 FRAP 的影响

玉米种子的总还原力仅为 3.12 μmol TE/g (图 5-3)。总体上，发芽玉米的总还原力随着发芽时间的延长呈现先上升后下降的趋势，但在 300 W 和 350 W/20 s 和 40 s 和 50 s/200 W 的处理下，发芽玉米的总还原力却逐渐增加。经过 200 W/20 s 的微波处理后，7 d 的发芽玉米总还原力达到最大值，为 18.12 μmol TE/g，比 CK 提高了 58.57%，是种子的 5.80 倍。分析表明，过高的微波功率或过长的微波时间会导致发芽玉米的总还原力在一定范围内降低，但数值上仍高于 CK，说明在不同微波处理条件下，发芽玉米的总还原力均有所提高，但适度的微波处理能够最大程度的提高发芽玉米的总还原力。

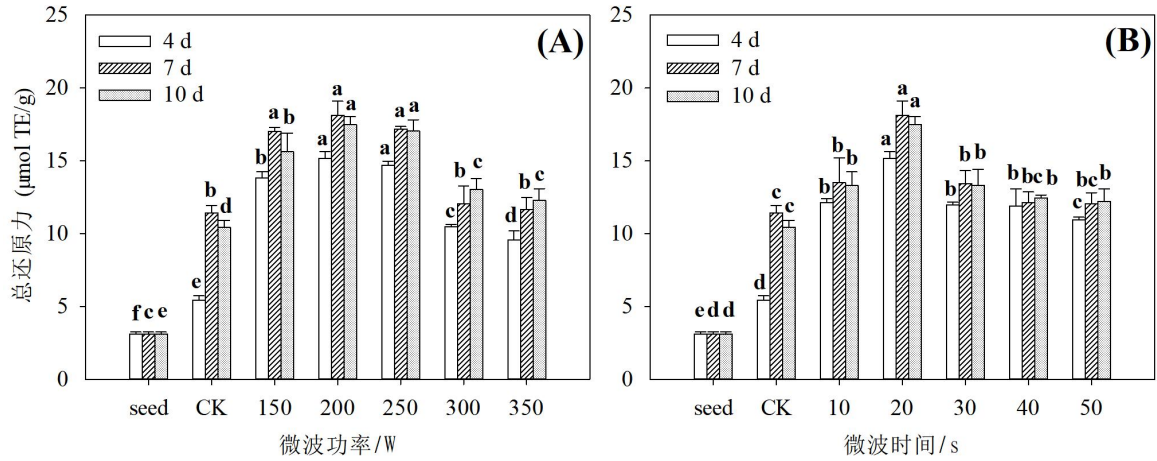


图 5-3 微波处理对发芽玉米 FRAP 的影响

Fig.5-3 Effect of microwave treatment on ferric reducing ability of germinated maize

5.5.4 微波处理对 SOD 活性的影响

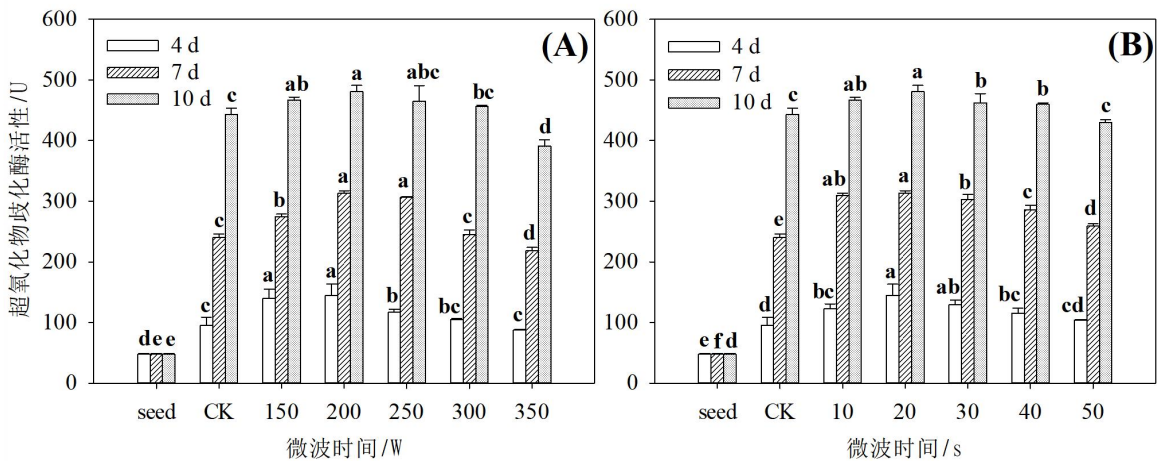


图 5-4 微波处理对发芽玉米 SOD 活性的影响

Fig.5-4 Effect of microwave treatment on the activity of superoxide dismutase of germinated maize

SOD 是广泛分布于植物体内的抗氧化酶^[127]，有效防御 ROS 对机体的损害。由图 5-4 可知，未发芽时，玉米种子的 SOD 活性为 47.69 U。随着发芽时间的延长，发芽玉米的 SOD 活性逐渐增强，均显著高于种子。在 200 W/20 s 的微波处理下，10 d 的发芽玉米中 SOD 活性达到最强，为 480.76 U，比 CK 提高了 8.46%，是种子的 10.08 倍。在 350 W 的微波功率下处理 20 s 后，发芽玉米 4、7、10 d 的 SOD 活性均低于 CK 组，实验表明，过度的微波处理会大大降低发芽玉米的 SOD 活性，适度的微波处理才能显著提高发芽玉米的 SOD 活性。

5.5.5 微波处理对 POD 活性的影响

POD 是植物体内一种重要的氧化还原酶，参与植物的抗氧化防御过程，将 NO、H₂O₂ 和 O₂ 等物质还原，避免氧化物的积累，防止其对植物细胞产生损害，此外 POD 还参与细胞壁的形成、有机物的代谢和植物信号传导的调节等。在植物的生长、发育、成熟、衰老、受到逆境胁迫的过程中，POD 的活性不断发生变化。由图 5-5 可知，玉米种子的 POD 活性为 55.93 U，发芽玉米中 POD 的活性随发芽时间的延长呈现逐渐增强的趋势。在 200 W 的微波功率下处理 20 s 后，10 d 的发芽玉米中 POD 活性达到最高，为 143.24 U，比 CK 提高了 56.27%，是种子的 2.56 倍。分析表明，过度的微波处理会导致发芽玉米的 POD 活性在一定范围内降低，但总体活性还是高于 CK 组，证明不同微波处理条件下，发芽玉米的 POD 活性均有所增强，但选择适合的微波处理条件能够最大程度的提高发芽玉米的 POD 活性。

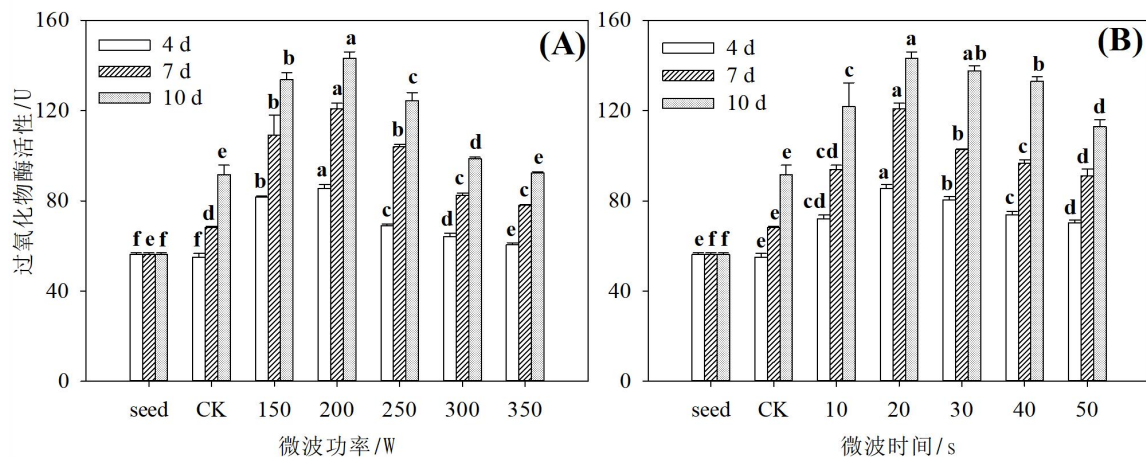


图 5-5 微波处理对发芽玉米 POD 活性的影响

Fig.5-5 Effect of microwave treatment on the activity of peroxidase of germinated maize

5.5.6 微波处理 CAT 活性的影响

CAT 是植物中参与清除自由基最重要的酶之一^[128]，它能将植物体内积累的 H₂O₂ 分解成水和分子氧，从而减少 H₂O₂ 对植物造成的氧化伤害。玉米种子的 CAT 活性仅为 34.15 U，但随着发芽时间的延长，发芽玉米中 CAT 的活性呈现先上升后下降的趋势，10 d 的发芽玉米中 CAT 活性比 4 d 有所下降，但仍远远高于种子中 CAT 的活性。在 200 W/20 s 的微波处理下，7 d 的发芽玉米中 CAT 活性最强，为 1109.06 U，比 CK 提高了 20.87%，是种子的 32.47 倍。分析表明，过高的微波功率或过长的微波时间会

导致发芽玉米的 CAT 活性在一定范围内降低,但活性仍比 CK 组高,说明在不同微波处理条件下,发芽玉米的 CAT 活性均有所增强,但适度的微波处理能够最大程度的提高发芽玉米的 CAT 活性。

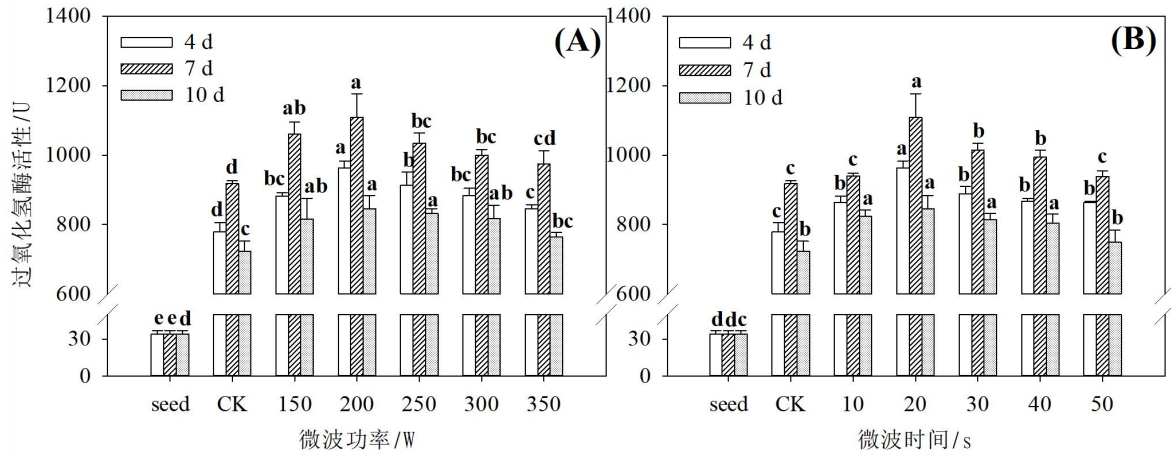


图 5-6 微波处理对发芽玉米中 CAT 活性的影响

Fig.5-6 Effect of microwave treatment on the activity of catalase of germinated maize

5.6 本章小结

本章采用不同的微波条件处理玉米种子,研究微波处理对玉米发芽后总还原力、DPPH 和 ABTS 自由基清除能力以及 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶活性的影响。研究表明,发芽能够显著提高玉米的抗氧化能力和抗氧化酶活性。适度的微波处理能提高发芽玉米对 DPPH 自由基的清除能力,但长时间的微波处理则会降低发芽玉米清除 DPPH 自由基的能力,微波功率 200 W 下处理 20 s 后,10 d 的发芽玉米清除 DPPH 自由基的能力最大,为 $21.62 \mu\text{mol TE/g}$,比 CK 提高了 28.81%,是种子的 6.11 倍。不同微波处理条件均能提高发芽玉米对 ABTS 自由基的清除能力,且 200 W/20 s 的微波处理能让 7 d 的发芽玉米清除 ABTS 自由基的能力最大 ($129.75 \mu\text{mol TE/g}$),较 CK 提高 37.67%,是种子的 4.97 倍。过高的微波功率或过长的微波时间会导致发芽玉米的总还原力在一定范围内降低,但数值上仍高于 CK 组,在 200 W 的微波功率下处理 20 s,10 d 的发芽玉米总还原力达到最高,为 $18.12 \mu\text{mol TE/g}$,比 CK 提高了 58.57%,是种子的 5.80 倍。

过度的微波处理会大大降低发芽玉米的 SOD 活性,适度的微波处理才能显著提高发芽玉米的 SOD 活性,在 200 W/20 s 的微波处理下,10 d 的发芽玉米中 SOD 活性达

到最强 (480.76 U), 比 CK 提高了 8.46%, 是种子的 10.08 倍。不同微波处理条件下, 发芽玉米的 POD 活性均有所增强, 但选择适合的微波处理条件能够最大程度的提高发芽玉米的 POD 活性, 在 200 W 的微波功率下处理 20 s, 10 d 的发芽玉米中 POD 活性达到最高, 为 143.24 U, 比 CK 提高了 56.27%, 是种子的 2.56 倍。不同的微波处理均能提高发芽玉米的 CAT 活性, 200 W/20 s 的微波处理使 7 d 的发芽玉米中 CAT 活性达到最高 (1109.06 U), 比 CK 提高了 20.87%, 是种子的 32.47 倍。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

本课题采用不同微波条件处理玉米种子，深入研究了微波处理后玉米种子的微观结构、萌发特性和芽苗生长情况以及发芽玉米的主要营养成分、活性成分和抗氧化能力的动态变化情况。主要的研究结论如下：

(1) 5 种玉米中 ZD 的叶黄素含量显著高于其他品种 ($P<0.05$)，且随着发芽时间的延长，叶黄素含量呈现先上升后下降的趋势，发芽至第 10 d 含量最高，为 15.67 mg/100 g。适度的微波处理能显著提高玉米的萌发特性，在 200 W/20 s 的微波处理下，玉米种子的发芽势、发芽率、发芽指数和 AGT 分别是 88.67%、99.33%、36.39 和 1.83 d，过度的微波处理会抑制玉米种子的最终发芽率，分析表明微波处理只在特定的功率和时间范围内能有效促进种子发芽。适度的微波处理提高玉米萌发后的芽长和可食部分鲜重，在 200 W/20 s 的微波处理下第 10 d 的芽长达到了 18.63 cm，可食部分鲜重为 1.79 g。在 200 W 的功率下微波处理 20 s 后，7 d 的发芽玉米的呼吸速率最高，比 CK 提高了 41.50%，是种子的 3.65 倍。SEM 图分析表明微波处理会改变玉米原有的细胞结构，使种子胚乳中蛋白质基质与淀粉粒的结合开始疏松，淀粉粒表面开始凹陷，且淀粉粒之间产生黏结现象，且随着微波功率的增大和微波时间的延长，蛋白质基质也开始大面积的脱离淀粉粒。

(2) 微波处理能显著提高发芽玉米中的水分含量，200 W/20 s 的微波处理后发芽 10 d 的玉米中水分含量最高，为 83.70%，较 CK 提高 7.60%。适度的微波处理能显著提高发芽玉米中淀粉的水解，在 200 W 的微波功率下处理 20 s 后，发芽 10 d 的玉米淀粉酶活性和还原糖含量分别为 2.68 U 和 17.73 g/100 g，分别比 CK 提高了 13.56% 和 6.04%，10 d 的发芽玉米中淀粉含量仅为 21.45 g/100 g，比种子减少了 68.44%。适度的微波处理可以提高发芽玉米中的游离氨基酸含量，且在 200 W 的功率下微波处理 20 s 后，7 d 的发芽玉米中游离氨基酸含量最高，为 32.09 mg/100g，比 CK 提高了 19.52%。微波处理能显著提高发芽玉米中可溶性蛋白的含量，加速脂肪分解成小分子物质，但

处理组之间的可溶性蛋白和脂肪含量的差异并不显著 ($P \geq 0.05$)。

(3) 微波处理能显著提高发芽玉米中的 MDA 含量,使得发芽玉米迅速在体内合成大量活性物质清除因逆境胁迫产生过量的自由基,且在 200 W/20 s 的微波处理下,第 10 d 的 MDA 含量最低 (1.23 nmol/g FW),比 CK 高 9.82%。适度的微波处理能够提高发芽玉米中脯氨酸的含量,在 200 W/20 s 的微波处理下,发芽 10 d 的玉米中脯氨酸含量最高,为 70.72 $\mu\text{g/g}$,比 CK 增加 15.48%。而 250 W/20 s 微波处理后发芽 4 d 的玉米中总酚含量达到峰值,为 4.27 mg/g,比 CK 增加了 46.05%。在 200 W/30 s 的处理下,10 d 的发芽玉米的 VC 含量最高,为 46.04 mg/100 g,比 CK 增加 15.52%,是种子的 103.23 倍。微波处理能显著提高发芽玉米的类胡萝卜素含量,在 200 W/20 s 的微波处理下,10 d 的发芽玉米中类胡萝卜素含量最高 (184.99 $\mu\text{g/g}$),比 CK 增加了 14.16%。微波处理能显著提高发芽玉米不同部位的叶黄素含量,在 200 W/20 s 的微波处理下,10 d 的发芽玉米的籽粒和芽苗的含量分别为 43.02 和 917.06 $\mu\text{g/g}$,分别比 CK 组提高了 6.14%和 11.53%,但根部的叶黄素含量比 CK 组降低了 12.46%。红外光谱分析表明,微波处理能提高发芽玉米中类胡萝卜素特征峰的吸收强度,发芽和适度的微波处理均能提高玉米中类胡萝卜素的含量。

(4) 适度的微波处理能最大限度的提高发芽玉米的抗氧化能力和抗氧化酶活性,但过高功率或过长时间的微波处理则会降低其抗氧化能力和抗氧化酶活性。微波功率 200 W 下处理 20 s 后,10 d 的发芽玉米清除 DPPH 自由基的能力最大 (21.62 $\mu\text{mol TE/g}$),比 CK 提高了 28.81%。不同微波处理条件均能提高发芽玉米的 ABTS 自由基清除能力和总还原力,且 200 W/20 s 的微波处理能让 7 d 的发芽玉米清除 ABTS 自由基的能力达到 129.75 $\mu\text{mol TE/g}$,比 CK 提高 37.67%; 10 d 的发芽玉米总还原力达到最高,为 18.12 $\mu\text{mol TE/g}$,比 CK 提高 58.57%。200 W/20 s 微波处理后,发芽 10 d 的玉米的 SOD 和 POD 活性均达到最高,分别为 480.76 U 和 143.24 U,分别比 CK 提高了 8.46%和 56.27%; 7 d 的发芽玉米 CAT 活性达到 1109.06 U,比 CK 提高了 20.87%。

6.2 展望

本课题研究微波处理对玉米种子萌发特性、主要营养成分、活性成分和抗氧化能力的影响,在此基础上,建议从以下几个方面深入研究:

(1) 本研究确定了不同的微波处理条件对发芽玉米中总叶黄素含量的影响，后续应使用高效液相色谱法对其余类胡萝卜素单体进行准确测定。

(2) 研究了发芽玉米中类胡萝卜素和叶黄素含量的动态变化，后续应对叶黄素合成路径上的关键合成酶（PSY、 ϵ -LCY 和 β -OHase 等）的变化情况进行深入研究。

(3) 测定了不同微波处理对发芽玉米的体外抗氧化能力，后续应对体内抗氧化能力进行深入研究。

参考文献

- [1] 杨小倩, 邹慧, 张辉, 等. 玉米不同部位化学成分、药理作用、利用现状研究进展 [J]. 吉林中医药, 2019, 39(06): 837-840.
- [2] 刘娟. 玉米发芽过程中淀粉特性变化及其应用研究 [D]. 南京; 南京农业大学, 2012.
- [3] 殷晶晶, 赵妍, 田晓花. 不同储藏温湿度对玉米中蛋白质的影响 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(03): 331-335.
- [4] 徐鑫, 毛红艳, 韩登旭, 等. 新疆不同玉米品种氨基酸营养价值评价[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(06): 244-249.
- [5] 玫玫. 粗粮之玉米的营养功效 [J]. 健康向导, 2013, 19(03): 46.
- [6] Zhang S Q, Ji J, Zhang S H, et al. Changes in the phenolic compound content and antioxidant activity in developmental maize kernels and expression profiles of phenolic biosynthesis-related genes [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 96(6): 103113.
- [7] Sun X, Ma L, Lux P E, et al. The distribution of phosphorus, carotenoids and tocochromanols in grains of four chinese maize (*Zea mays* L.) varieties [J]. Food Chemistry, 2021, 367(4): 130725.
- [8] 杜锐玲. 叶黄素通过 PI3K/AKT 信号通路调控胃癌干细胞增殖与凋亡 [J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(29): 4593-4598.
- [9] Zhang X, Spiegelman D, Baglietto L, et al. Carotenoid intakes and risk of breast cancer defined by estrogen receptor and progesterone receptor status: a pooled analysis of 18 prospective cohort studies [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2012, 95(3): 713-725.
- [10] Elhadidy M G, El Nashar E M, Alghamdi M A, et al. A novel gastroprotective effect of zeaxanthin against stress-induced gastritis in male rats targeting the expression of HIF-1 α , TFF-1 and MMP-9 through PI3K/Akt/JNK signaling pathway [J]. Life Sciences, 2021, 273(10): 119297.
- [11] Walchuk C. Effects of lutein and docosahexaenoic acid enriched egg consumption on visual function in older adults: Implications for age-related macular degeneration [J]. Journal of Functional Foods, 2017, 89(2): 104913.
- [12] Frede K, Ebert F, Kipp A P, et al. Lutein Activates the Transcription Factor Nrf2 in Human Retinal Pigment Epithelial Cells [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(29): 5944-5952.
- [13] Beta T, Hwang T. Influence of heat and moisture treatment on carotenoids, phenolic content, and antioxidant capacity of orange maize flour [J]. Food Chemistry, 2018, 246(9): 58-64.
- [14] 刘恩山. 七年级上册生物学（北师大版） [M]. 北京; 北京师范大学出版社. 2015: 101.
- [15] 魏旭彤. 玉米种子活力影响因素研究 [D]. 哈尔滨; 东北农业大学, 2019.
- [16] 王笑, 蔡剑, 周琴, 等. 非生物逆境锻炼提高作物耐逆性的生理机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2287-2301.
- [17] 孙鹏程. 盐胁迫下玉米种子萌发机理的新探索 [D]. 泰安; 山东农业大学, 2020.
- [18] Galpaz N, Reymond M. Natural variation in *Arabidopsis thaliana* revealed a genetic network controlling germination under salt stress [J]. PloS One, 2010, 5(12): e15198.
- [19] Liang W, Ma X, Wan P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: A review [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 495(1): 286-291.
- [20] 胡燕梅, 郭云贵, 姚艳, 等. 盐胁迫对玉米种子萌发及其幼苗生长的影响 [J]. 江汉大学学报(自然

科学版), 2017, 45(02): 137-143.

[21] 尹相博, 李青, 王绍武. 外源物质缓解盐胁迫下植物幼苗生长的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2013, 24(11): 147-150.

[22] Zhao Y, Lu K, Zhang W, et al. PagDA1a and PagDA1b expression improves salt and drought resistance in transgenic poplar through regulating ion homeostasis and reactive oxygen species scavenging [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 201(8): 107898.

[23] 彭浩, 宋文路, 王晓强. 水杨酸、脱落酸对盐胁迫下玉米种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 玉米科学, 2016, 24(06): 75-78+87.

[24] 张成冉, 徐广海, 宋朝玉, 等. 糖浸种对盐胁迫玉米种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 种子, 2021, 40(08): 51-56.

[25] Bradford K J. A Water Relations Analysis of Seed Germination Rates [J]. Plant Physiology, 1990, 94(2): 840-849.

[26] 玉米种子发芽率的影响因素与改善措施 [J]. 种子科技, 2021, 39(19): 133-134.

[27] 玉米种子发芽试验技术关键[J]. 中国科技信息, 2022, 1(03): 49-50.

[28] 杨志莹, 邱玉宾, 张海良, 等. 丁香种子研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(21): 33-35.

[29] 姜君. 浅谈影响玉米种子发芽的因素及改善措施 [J]. 种子科技, 2017, 35(03): 73+75.

[30] Sánchez B, Rasmussen A, Porter J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review [J]. Global Change Biology, 2014, 20(2): 408-417.

[31] 徐婷, 王俊强, 韩业辉, 等. 低温冷害对不同玉米种子萌发及 α -淀粉酶活性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023, 34(10): 1-5.

[32] 陈紫欣. 低温胁迫对玉米幼苗生长发育的影响研究 [D]. 长沙; 湖南农业大学, 2022.

[33] 徐婷, 王俊强, 韩业辉, 等. 外源甜菜碱浸种对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2023, 34(08): 8-12.

[34] 朱雅琪, 巫静, 余震, 等. 我国农田土壤重金属污染现状及治理研究进展[J]. 现代农业科技, 2024, 30(05): 115-118+125.

[35] 唐希望, 周阳, 王龙雪, 等. 盐镉耦合胁迫对玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 东北农业科学, 2022, 47(05): 25-29.

[36] 姚伦富, 文科元, 黄锦涛, 等. 重金属镉、铅及其复合污染对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2014, 20(24): 21-22.

[37] 郑冉, 吕丹, 罗红兵. 光照对玉米种子萌发与生理指标的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(03): 497-504.

[38] 王一涛, 张美莉, 张旭. 不同胁迫方式对发芽玉米粉理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 48(14): 1-11.

[39] Karmakar S, Billah M, Hasan M, et al. Impact of LFGD ($Ar+O_2$) plasma on seed surface, germination, plant growth, productivity and nutritional composition of maize (*Zea mays* L.) [J]. Heliyon, 2021, 7(3): e06458.

[40] 迟宇新, 范博文, 林俊俊, 等. 不同维生素浸种对玉米种子萌发的影响 [J]. 玉米科学, 2019, 27(01): 75-80.

[41] 薛云皓, 仵红梅, 王爱月, 等. 玉米发芽前后的营养变化 [J]. 河南医学研究, 2001, 10(01): 5-7.

[42] 张钟, 叶华, 孙青月. 发芽对黑糯玉米营养成分、热能变化和蛋白质消化率的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(10): 36-40.

[43] 姚英政, 董玲, 黎剑, 等. 甜玉米发芽条件对其营养品质的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版),

2015, 52(04): 906-910.

[44] Nieves-Hernández M G, Correa-Piña B L, Esquivel-Fajardo E A, et al. Study of morphological, structural, pasting, thermal, and vibrational changes in maize and isolated maize starch during germination [J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 111(5): 103685.

[45] Kaur H, Gill B S. Comparative evaluation of physicochemical, nutritional and molecular interactions of flours from different cereals as affected by germination duration [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(3): 1147-1157.

[46] Gong K J, Chen L R, Li X Y, et al. Effects of germination combined with extrusion on the nutritional composition, functional properties and polyphenol profile and related in vitro hypoglycemic effect of whole grain corn [J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 83(11): 1-8.

[47] 崔乃元, 奚文博, 崔莲花. 发芽处理对玉米脂肪酸和氨基酸组成的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2019, 42(04): 137-139+181-182.

[48] Chavarín-Martínez C D, Gutiérrez-Dorado R, Perales-Sánchez J X K, et al. Germination in Optimal Conditions as Effective Strategy to Improve Nutritional and Nutraceutical Value of Underutilized Mexican Blue Maize Seeds [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2019, 74(2): 192-199.

[49] Hiran P, Kerdchoechuen O, Laohakunjit N. Combined effects of fermentation and germination on nutritional compositions, functional properties and volatiles of maize seeds [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 71(11): 207-216.

[50] 方晓敏, 任世达, 贾睿, 等. 低频静磁场对发芽玉米酚类物质富集及降糖活性的影响 [J]. *食品科学*, 2022, 43(19): 88-94.

[51] Chalorchaoenyong W, Lomthaisong K, Suriharn B, et al. Germination process increases phytochemicals in corn [J]. *International Food Research Journal*, 2017, 24(2): 552-558.

[52] Lu Y Z, Wang F Y, Luo H, et al. Changes in phytochemical profiles, relevant enzyme activity and antioxidant capacity of different germinated maize varieties [J]. *Food Bioscience*, 2023, 56(06): 103410.

[53] 秦莉. O₂ 对玉米籽粒品质性状及穗行数的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.

[54] 包怡红, 罗浩, 何伟伟, 等. 玉米籽粒发芽过程中不同部位类胡萝卜素合成动态及抗氧化活性 [J]. *现代食品科技*, 2020, 36(06): 40-45+334.

[55] 徐昊, 何伟伟, 李大婧, 等. 外源脱落酸对发芽玉米籽粒中类胡萝卜素合成的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(18): 1-8.

[56] Xiang N, Zhao Y, Wang S, et al. The modulation of light quality on carotenoids in maize (*Zea mays* L.) sprouts [J]. *Food Chem (Oxf)*, 2022, 5(1): 100128.

[57] Luo H, He W W, Li D J, et al. Effect of methyl jasmonate on carotenoids biosynthesis in germinated maize kernels [J]. *Food Chemistry*, 2020, 307(6): 125525.

[58] He W W, Luo H, Xu H, et al. Effect of exogenous methyl jasmonate on physiological and carotenoid composition of yellow maize sprouts under NaCl stress [J]. *Food Chemistry*, 2021, 361(27): 130177.

[59] Naumenko N, Potoroko I, Kalinina I. Stimulation of antioxidant activity and gamma-aminobutyric acid synthesis in germinated wheat grain *Triticum aestivum* L. by ultrasound: Increasing the nutritional value of the product [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 86(5): 106000.

[60] 杨慧, 周霖, 边媛媛, 等. 非热加工技术对种子萌发生物效应的研究进展 [J]. *食品工业*, 2020, 41(07): 211-215.

[61] Bigu-Del-Blanco J, Bristow J M, Romero-Sierra C. Effects of low-level microwave radiation on germination and growth rate in corn seeds [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1977, 65(7): 1086-1088.

- [62] Reddy M V B, Raghavan G S V, Kushalappa A C, et al. Effect of microwave treatment on quality of wheat seeds infected with *Fusarium graminearum* [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(2): 113-117.
- [63] Talei D, Valdiani A, Maziah M, et al. Germination response of MR 219 rice variety to different exposure times and periods of 2450 MHz microwave frequency [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013(7): 408026.
- [64] Ma H, Xu X M, Wang S M, et al. Effects of microwave irradiation of *Fagopyrum tataricum* seeds on the physicochemical and functional attributes of sprouts [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 165(13): 113738.
- [65] Rifna E J, Ramanan K R, Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86(4): 95-108.
- [66] 汪雨茜. 中波紫外光和 NaCl 胁迫发芽玉米籽粒富集叶黄素的研究 [D]. 哈尔滨; 东北林业大学, 2019.
- [67] 卞紫秀. 微波联合外源 L-Phe 处理诱导萌发苦荞富集黄酮类物质的研究 [D]. 芜湖; 安徽工程大学, 2021.
- [68] 周劲松, 罗绍春, 汤泳萍, 等. 芦笋种子发芽率、发芽势测定及多胚现象观察[J]. 江西农业学报, 2014, 26(04): 30-32.
- [69] 杨孝臣, 李妍妍, 丰光. 甜玉米的分类和生物学特征及其栽培技术 [J]. 现代农业科技, 2008, 489(19): 236+238.
- [70] Wang S M, Wang J F, Guo Y B. Microwave irradiation enhances the germination rate of Tartary buckwheat and content of some compounds in its sprouts [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2018, 68(3): 195-205.
- [71] Benlloch-Tinoco M, Igual M, Rodrigo D, et al. Comparison of microwaves and conventional thermal treatment on enzymes activity and antioxidant capacity of kiwifruit puree [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 19(3): 166-172.
- [72] 王顺民, 卞紫秀, 汪建飞, 等. 微波处理对豌豆种子萌发及芽苗中营养成分的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(05): 40-46.
- [73] 张蕊思, 施宠, 安沙舟, 等. 微波辐射对冰草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2015, 37(05): 69-74.
- [74] Jakubowski T. The impact of microwave radiation at different frequencies on weight of seed potato germs and crop of potato tubers [J]. Inzynieria Rolnicza, 2010, 6(124): 57-64.
- [75] 胡燕月, 林伟萍, 曹纺平, 等. 磁场、微波、热击对水稻种子胚呼吸和萌发的影响 [J]. 浙江师大学报(自然科学版), 1994, 17(02): 68-72+56.
- [76] Lemmens E, Moroni A V, Pagand J, et al. Impact of cereal seed sprouting on its nutritional and technological properties: A critical review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(1): 305-328.
- [77] Han C X, Zhen S M, Zhu G R, et al. Comparative metabolome analysis of wheat embryo and endosperm reveals the dynamic changes of metabolites during seed germination [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 115(6): 320-327.
- [78] 蒲华寅, 陈旭艳, 郭思敏, 等. 微波处理对不同链支比玉米淀粉结构及理化性质的影响 [J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40(02): 39-45.
- [79] Tian Y, Wang Y, Herbuger K, et al. High-pressure pasting performance and multilevel structures of

- p>short-term microwave-treated high-amylose maize starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 322(24): 121366.
- [80] 渠琛玲, 刘胜强, 王芳婷, 等. 微波辐射对小麦种子微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(01): 125-128+146.
- [81] Lan Y, Zhang W, Liu F, et al. Recent advances in physiochemical changes, nutritional value, bioactivities, and food applications of germinated quinoa: A comprehensive review [J]. Food Chemistry, 2023, 426(29): 136390.
- [82] Liu S Y, Wang W, Lu H Y, et al. New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123(5): 187-197.
- [83] Messias-Rda S, Galli V, Silva S D, et al. Micronutrient and functional compounds biofortification of maize grains [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(1): 123-139.
- [84] Lu X Y, Wang S M, Dong Y L, et al. Effects of microwave treatment on the microstructure, germination characteristics, morphological characteristics and nutrient composition of maize [J]. South African Journal of Botany, 2024, 165(2): 144-152.
- [85] Khatri D, Chhetri S B B. Reducing Sugar, total phenolic content, and antioxidant potential of Nepalese plants [J]. BioMed Research International, 2020, 2020(11): 7296859.
- [86] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1): 248-254.
- [87] Yousaf W, Shah A A, Afzal M B, et al. Supplementation of nano-biochar improved growth and physiological attributes in wheat seedlings exposed to salt stress through enhanced activity of hydrolysing and nitrogen metabolic enzymes and regulation of crucial metabolites [J]. South African Journal of Botany, 2024, 167(4): 500-508.
- [88] Takahashi M, Yanai Y, Umeda H, et al. Relationship between growth and N:P of cabbage (*Brassica oleracea* L., var. *capitata*) plug seedlings according to moisture content and nitrogen and phosphorus application after transplanting [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 233(7): 294-301.
- [89] 李于坤. 宁夏中部干旱带降雨量和种植密度对猪毛菜适应性生长的研究 [D]. 银川; 宁夏大学, 2021.
- [90] Liu B, Lin R, Jiang Y, et al. Transcriptome analysis and identification of genes associated with starch metabolism in *Castanea henryi* seed (Fagaceae) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(4): 1431-1446.
- [91] Berjak P, Pammenter N W. From *Avicennia* to *Zizania*: seed recalcitrance in perspective [J]. Annals of Botany, 2008, 101(2): 213-228.
- [92] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis [M]//GOVINDJEE. Photosynthesis, Vol 2: Development, carbon metabolism, and plant productivity. Chicago, USA; Academic Press. 1982: 263-343.
- [93] Liu H J, Zhong X, Huang Y, et al. Production of free amino acid and shortpeptide fertilizer from rapeseed meal fermentation using *Bacillus flexus* NJNPD41 for promoting plant growth [J]. Pedosphere, 2018, 28(2): 261-268.
- [94] Mohammed A, Mohammed H A. Beneficial role of broccoli and its active ingredient, sulforaphane in the treatment of diabetes [J]. Phytomedicine Plus, 2023, 3(2): 100431.
- [95] Qin P Y, Wei A C, Zhao D G, et al. Low concentration of sodium bicarbonate improves the bioactive compound levels and antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of tartary buckwheat sprouts [J]. Food

Chemistry, 2017, 224(10): 124-130.

[96] Yin Y Q, Xue J Y, Hu J J, et al. Exogenous methyl jasmonate combined with Ca^{2+} promote resveratrol biosynthesis and stabilize sprout growth for the production of resveratrol-rich peanut sprouts [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 203(10): 107988.

[97] Johra F T, Bepari A K, Bristy A T, et al. A Mechanistic Review of β -Carotene, Lutein, and Zeaxanthin in Eye Health and Disease [J]. Antioxidants, 2020, 9(11): 1046.

[98] 马少杰. 婴幼儿配方奶粉中叶黄素的稳定性研究 [D]. 哈尔滨; 东北农业大学, 2018.

[99] Mrowicka M, Mrowicki J, Kucharska E, et al. Lutein and Zeaxanthin and Their Roles in Age-Related Macular Degeneration-Neurodegenerative Disease [J]. Nutrients, 2022, 14(4): 827.

[100] 黄浩, 翁霞. 超声波辅助酶法提取玉米黄色素的工艺研究[J]. 鞍山师范学院学报, 2021, 23(04): 49-52.

[101] Johnson E J. Role of lutein and zeaxanthin in visual and cognitive function throughout the lifespan [J]. Nutrition Reviews, 2014, 72(9): 605-612.

[102] 罗浩. 外源茉莉酸甲酯调控发芽玉米籽粒合成类胡萝卜素的研究 [D]. 哈尔滨; 东北林业大学, 2020.

[103] 汪建飞. 微波处理下苦荞麦萌发及其芽苗抗氧化活性的研究 [D]. 芜湖; 安徽工程大学, 2019.

[104] Toscano S, Gómez-Bellot M J, Romano D, et al. Physiological and biochemical changes in response to Moringa oleifera biostimulant in petunia plants under water deficit [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 319(12): 112187.

[105] Dadach M, Gairola S, Hameed A, et al. Effects of different chloride salts on seed germination and early seedling performance of Ceratonia siliqua, a multipurpose tree of the Mediterranean region [J]. South African Journal of Botany, 2023, 158(7): 8-17.

[106] GB 5009.86-2016 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定 [J]. 2016.

[107] 王立梅. 不同品种白掌对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价 [D]. 重庆; 西南大学, 2016.

[108] Choudhury D, Rong N, Senthil Kumar H V, et al. Proline restores mitochondrial function and reverses aging hallmarks in senescent cells [J]. Cell Reports, 2024, 43(2): 113738.

[109] Kodikara C, Netticadan T, Bandara N, et al. A new UHPLC-HRMS metabolomics approach for the rapid and comprehensive analysis of phenolic compounds in blueberry, raspberry, blackberry, cranberry and cherry fruits [J]. Food Chemistry, 2024, 445(15): 138778.

[110] 管玉格. 鲜切西兰花酚类物质生物合成机制及其抗氧化活性的研究 [D]. 大连; 大连理工大学, 2023.

[111] 管玉格, 王怡, 袁宁, 等. 鲜切果蔬酚类物质生物合成机制及抗氧化活性研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(02): 1-9.

[112] 于雪娜, 王荣艳, 张学康, 等. 不同萌发期黄豆芽活性物质检测及营养价值分析[J]. 绿色科技, 2019, 9(01): 14-15.

[113] 赵萌萌, 李阳博, 张茜. 微波处理对绿豆萌发及豆芽品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2015, 43(06): 74-77+81.

[114] 杨羿. 叶黄素, 吃还是不吃? [J]. 中国眼镜科技杂志, 2023, 30(06): 104-108.

[115] 林启凰, 林聪炜, 张娜, 等. 炮仗花类胡萝卜素含量测定及抗炎活性研究 [J]. 化学与生物工程, 2020, 37(03): 42-47.

[116] 李晓银. 柿子皮中类胡萝卜素化合物的分离鉴定及稳定性研究 [D]. 西安; 西北工业大学, 2006.

[117] 王思蒙. 微波处理对萌发苦荞蛋白特性和生物活性的影响 [D]. 芜湖; 安徽工程大学, 2022.

- [118] Klaunig J E. Oxidative Stress and Cancer [J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2019, 24(40): 4771-4778.
- [119] Wen C T, Zhang J X, Zhang H H, et al. Plant protein-derived antioxidant peptides: Isolation, identification, mechanism of action and application in food systems: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105(10): 308-322.
- [120] Arbona V, Gómez-Cadenas A. Hormonal Modulation of Citrus Responses to Flooding [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2008, 27(3): 241-250.
- [121] 吕丹, 郑冉, 罗红兵. 不同光照条件对玉米萌发过程中营养成分和抗氧化酶活性的影响[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(07): 1988-1996.
- [122] Bian Z X, Wang J F, Ma H, et al. Effect of microwave radiation on antioxidant capacities of Tartary buckwheat sprouts [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(10): 3913-3919.
- [123] Wang S M, Xu X M, Wang S M, et al. Effects of Microwave Treatment on Structure, Functional Properties and Antioxidant Activities of Germinated Tartary Buckwheat Protein [J]. *Foods*, 2022, 11(10): 1373.
- [124] 杨焱, 胡九菊, 李林霖, 等. 蜂王浆中超氧化物歧化酶的活性测定与应用 [J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(01): 180-185.
- [125] Al-Madhagi H, Yazbik V, Abdelwahed W. One-step isolation and purification of peroxidase from zucchini heads [J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2023, 66(6): 30-37.
- [126] Wang W, Shi S, Kang W, et al. Enriched endogenous free Spd and Spm in alfalfa (*Medicago sativa* L.) under drought stress enhance drought tolerance by inhibiting H_2O_2 production to increase antioxidant enzyme activity [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2023, 291(12): 154139.
- [127] 魏婧, 徐畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(12): 2571-2584.
- [128] Liu K D, Yuan C C, Chen Y, et al. Combined effects of ascorbic acid and chitosan on the quality maintenance and shelf life of plums [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 176(10): 45-53.

攻读硕士学位期间取得的成果

- [1] Effects of microwave treatment on the microstructure, germination characteristics, morphological characteristics and nutrient composition of maize[J]. South African Journal of Botany, 2023,165:144-152. (DOI: 10.1016/j.sajb.2023.12.034, 第一作者).
- [2] 2021 年安徽省大学生食品设计创新大赛三等奖（第六）。
- [3] 第十一届芜湖市大学生专利创新大赛优秀奖（第一）。

致谢

回首过往三年，有喜悦、希望、遗憾，但更多的是感激之情，感谢母校的栽培，感谢我所遇到的良师益友。

盛行千里，不忘师恩。感谢我的导师王顺民教授，从选题、开题报告、修改到最后完成论文，王老师一次又一次悉心的指导和殷切的敦促，让我的论文得以顺利完成。王老师不仅教授我学术方面的知识，也教会我为人处世的道理。在此，向我的恩师表达崇高的敬意和衷心的感谢。同时，我要感谢生食学院蔡为荣老师、郭玉宝老师、徐继成老师、张国强老师等食品专业课老师在各方面给予我的帮助，让我学到了很多专业知识。

愿岁并谢，与友长兮。感谢彭文苹师姐、徐为雯师姐、姚鑫钧师兄、王楠同学、董雨露师妹、束志伟师弟、吴宁宁师妹和徐雨蝶师妹对我实验方面的帮助，感谢汪思诚同学在生活上的陪伴和鼓励，感谢室友王慧琴的照顾。

以梦为马，不负韶华。感谢我自己，不论碰到什么困难都不放弃。在以后的日子里，我会继续努力，保持积极向上的态度面对学习和工作，不断提高自己的能力，成为更好的自己。往事暗沉不可追，来日之路光明灿烂，愿未来纯净明朗，喜乐长宁。

春晖寸草，山海高深。感谢父母二十余载的辛苦栽培，他们尽自己最大的努力为我提供更好的生活，在各个方面给予我帮助和支持。他们教会我很多道理，给我自己选择的权利，做自己喜欢做的事情，愿爸爸妈妈岁岁年年皆平安。

最后，感谢我的祖国，因为他的培养，我才能茁壮成长，愿祖国母亲更加繁荣昌盛。

作者：陆新月

2024年03月04日