分类号：　　密　　级：公 开
学　号：20202109079　　单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文

预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响研究

学位申请人　李义璨
指导教师　郑霞 教授
　　贾文婷 副研究员

申请学位类别　专业硕士
专业名称　机械
研究领域　不区分领域
所在学院　机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2023 年 5 月

分类号：　　密　　级：公 开
学　号：20202109079　　单位代码：10759

石河子大学
硕士学位论文

预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响研究

学 位 申 请 人　李义璨
指 导 教 师　郑霞 教授
　　贾文婷 副研究员
申请学位类别　专业硕士
专 业 名 称　机械
研 究 领 域　不区分领域
所 在 学 院　机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2023 年 5 月

Effect of pretreatment on infrared drying characteristics and quality of Hami-melon slices

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Mechanics

By

Li Yi-can

（Mechanical engineering）

Dissertation Supervisor: Prof. Zheng Xia

May,2023

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：李义樂　　时间：2023 年 5 月 17 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：李义樂　　时间：2023 年 5 月 17 日

导师签名：郑霞　　时间：2023 年 5 月 17 日

摘要

哈密瓜是我国新疆地区的特色果品之一，口感脆爽、风味独特，深受消费者喜爱。但新鲜哈密瓜水分多、含糖量高，不易保存，同时运输等环节又易使果体受机械损伤造成腐烂损耗。将哈密瓜干制是解决上述问题的重要手段之一。本文为探究最适合哈密瓜片的干燥工艺，根据哈密瓜片干制加工技术的国内外研究现状，对比分析了四种典型的哈密瓜片干燥特性及其品质，为弥补单一干燥的不足，对比研究了三种常用的干燥预处理方式，研究结果表明将超声波应用至哈密瓜片红外干燥的预处理中，可以有效缩短干燥时间并保持较好的品质。本文在单因素试验的基础上，研究和优化了干燥工艺，为哈密瓜片干制加工的提质增效提供技术和理论参考。

主要研究内容和结论如下：

（1）研究了不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性及品质的影响。对比分析了冷冻干燥（FD）、红外干燥（IRD）、热风干燥（HAD）和微波真空干燥（MVD）对哈密瓜片干燥特性、色泽、质构、复水性以及微观组织结构的影响，得出 FD、HAD 耗时较长，IRD、MVD 干燥速率快耗时短；干燥模型拟合结果显示，Wang and Singh 模型适用于模拟 FD、HAD 干燥过程，Logarithmic 模型适用于描述 IRD 过程的脱水规律，Page 和 Weibull 模型适用于模拟 MVD 干燥过程；IRD 产品综合品质好，各指标均优于 MVD 和 HAD 产品，FD 产品品质最佳；微观结构观察结果显示，FD 产品较好的保持了原有结构，IRD 对产品的细胞损伤较小且具有一定的膨化作用，HAD、MVD 较大的破坏了产品的内部结构。综上，IRD 可在较短的时间内获得高品质的产品，综合评分最高，因此确定红外干燥为哈密瓜片的干燥方法。

（2）研究了不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响，对比分析了超声处理、烫漂处理、渗透处理对哈密瓜片红外干燥特性、色泽、质构、复水性以及微观组织结构的影响。超声处理能够加速物料内水分迁移，其干燥耗时最短，烫漂处理组耗时较对照组略有缩短，渗透处理组耗时最长且产品未能达到目标含水率；干燥模型拟合结果显示，Page、Weibull 模型适用于描述哈密瓜片超声处理后 IRD 的脱水规律，Two-term 模型适用于模拟哈密瓜片烫漂处理后 IRD 的干燥过程，Logarithmic 和 Two-term 模型适用于描述哈密瓜片渗透处理后 IRD 干燥过程的水分比变化情况；超声处理组综合评分最高，超声处理能够有效改善哈密瓜红外干制品品质。综上，确定超声处理为哈密瓜片红外干燥的预处理方式。

（3）为优化哈密瓜片超声处理红外干燥工艺，本文以超声处理时间、干燥温度、切片厚度为影响因素，以干燥时间、色差值和 Vc 含量为评价指标，进行了响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计试验研究。单因素试验结果表明，各影响因素对哈密瓜片红外干燥过程影响显著；建立了哈密瓜超声处理红外干燥的干燥时间、色差值、Vc 含量与超声处理时间、干燥温度、切片厚度的回归模型，R^2 分别为 0.999 8、0.999 4、0.999 9；各因素对干燥时间的影响从大到小依次为：切片厚度（X_2）、干燥温度（X_1）、超声处理时间（X_3）；对色差值的影响顺序为：

X_2>X_1>X_3；对 Vc 含量的影响顺序为：X_2>X_1>X_3。优化后的工艺参数为干燥温度 61 ℃、切片厚度 6 mm、超声处理时间 15 min。此时，干燥时间为 115 min，色差值为 13.79，Vc 含量为 112.1 mg/100 g。相较于未处理产品，干燥时间缩短 45.24%，色差减小 13.38%，Vc 含量提高 16.71%，微观结构对比结果显示超声波引起了哈密瓜片内部组织膨胀收缩，形成了细胞微通道，出现的多孔道结构，减少了水分迁移扩散的阻力。

关键词：哈密瓜；红外干燥；预处理；超声波；品质

Abstract

Hami-melon is one of the characteristic fruits in Xinjiang, China. It has crisp taste and unique flavor, and is deeply loved by consumers. However, fresh Hami-melon is rich in water and high in sugar, which is not easy to preserve. At the same time, transportation and other links are easy to cause mechanical damage to the fruit body and cause decay and loss. Drying Hami-melon is one of the important means to solve the above problems. In order to explore the most suitable drying technology for Hami-melon slices, according to the domestic and international research status of the drying technology of Hami-melon slices, the drying characteristics and quality of four typical Hami-melon slices were compared and analyzed. In order to make up for the deficiency of single drying, three commonly used drying pretreatment methods were compared and studied, It can effectively shorten drying time and maintain good quality. Based on the single factor experiment, the drying process was studied and optimized in this paper, which provided technical and theoretical reference for the quality and efficiency improvement of the dried Hami-melon slices.

The main research contents and conclusions are as follows:

(1) The effects of different drying methods on the drying characteristics and quality of Hami-melon slices were studied. The effects of freeze drying (FD), infrared drying (IRD), hot air drying (HAD) and microwave vacuum drying (MVD) on the drying characteristics, color, texture, rehydration and microstructure of Hami-melon slices were compared and analyzed. It was concluded that FD and HAD took longer time, and IRD and MVD drying rate were faster and shorter; The drying model fitting results show that Wang and Singh model is suitable for simulating FD and HAD drying process, Logarithmic model is suitable for describing the dehydration law of IRD process, and Page and Weibull model is suitable for simulating MVD drying process; The comprehensive quality of IRD products is good, all indicators are better than MVD and HAD products, and the quality of FD products is the best; The microstructure observation results showed that FD products kept their original structure well, IRD had little damage to the cells of the products and had a certain swelling effect, and HAD and MVD had a large damage to the internal structure of the products. In conclusion, IRD can obtain high-quality products in a relatively short time, with the highest comprehensive score. Therefore, infrared drying was determined as the drying method for Hami-melon slices.

(2) The effects of different pretreatments on the infrared drying characteristics and quality of Hami-melon slices were studied. The effects of ultrasonic treatment, blanching treatment and osmotic treatment on the infrared drying characteristics, color, texture, rehydration and microstructure of Hami-melon slices were compared and analyzed. Ultrasonic treatment can accelerate the water migration in the

material, and its drying time is the shortest. The time of blanching treatment group is slightly shorter than that of the control group. The time of osmotic treatment group is the longest and the product fails to reach the target water content; The drying model fitting results showed that Page and Weibull models were suitable for describing the dehydration law of IRD after ultrasonic treatment of Hami-melon slices, Two-term models were suitable for simulating the drying process of IRD after blanching of Hami-melon slices, and Logarithmic and Two-term models were suitable for describing the change of water ratio in the drying process of IRD after osmotic treatment of Hami-melon slices; The ultrasonic treatment group has the highest comprehensive score, and ultrasonic treatment can effectively improve the quality of infrared dried Hami-melon products. In conclusion, ultrasonic treatment was determined as the pretreatment method for infrared drying of Hami-melon slices.

(3) In order to optimize the infrared drying process of ultrasonic treatment of Hami-melon slices, this paper took the ultrasonic treatment time, drying temperature and slice thickness as the influencing factors, and the drying time, color difference value and VC content as the evaluation indexes, and carried out the experimental study of Box-Behnken center combination design in response surface method. The results of single factor test showed that each factor had a significant effect on the infrared drying process of Hami-melon slices; The regression models of drying time, color difference value, VC content and ultrasonic treatment time, drying temperature and slice thickness of ultrasonic treatment infrared drying of Hami-melon were established. R^2 was 0.999 8, 0.999 4 and 0.999 9, respectively; The effects of various factors on drying time are as follows: slice thickness (X_2), drying temperature (X_1), ultrasonic treatment time (X_3); The order of influence on color difference value is: $X_2>X_1>X_3$; The order of influence on VC content is $X_2>X_1>X_3$. The optimized process parameters are drying temperature 61 ℃, slice thickness 6 mm and ultrasonic treatment time 15 min. At this time, the drying time is 115 min, the color difference value is 13.79, and the VC content is 112.1 mg/100 g. Compared with untreated products, the drying time is reduced by 45.24%, the color difference is reduced by 13.38%, and the VC content is increased by 16.71%. The microstructure comparison results show that ultrasound causes the expansion and contraction of the internal tissue of Hami-melon slices, forming cell microchannels, and the appearance of porous channel structure, reducing the resistance of water migration and diffusion.

Key words: Hami-melon; Infrared Drying; Pretreatment; Ultrasonic; Quality

目 录

摘要 I
Abstract III
第 1 章 绪论 1
1.1 研究背景及意义 1
1.2 干燥及干燥预处理技术 2
1.2.1 干燥技术研究进展 2
1.2.2 干燥预处理技术研究进展 4
1.2.3 哈密瓜干燥及其预处理技术现状 6
1.2.4 哈密瓜干制品各评价指标的选定 7
1.3 研究内容及技术路线 8
1.3.1 研究目标 8
1.3.2 研究内容 9
1.3.3 研究方法 9
1.3.4 技术路线 10
1.4 本章小结 11
第 2 章 不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性及品质的影响 12
2.1 材料与方法 12
2.1.1 试验材料 12
2.1.2 仪器设备 13
2.1.3 试验方法 13
2.1.4 试验参数测定 14
2.1.5 统计分析 16
2.2 结果与分析 17
2.2.1 不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性的影响 17
2.2.2 不同干燥方法对哈密瓜片色泽的影响 17
2.2.3 不同干燥方法对哈密瓜片质构特性的影响 18
2.2.4 不同干燥方法对哈密瓜片复水比的影响 19
2.2.5 不同干燥方法对哈密瓜片微观结构的影响 20
2.2.6 不同干燥方法下的水分有效扩散系数与干燥数学模型研究 20
2.2.7 不同干燥方法下哈密瓜干制品的综合评分 23

2.3 本章小结 24
第 3 章 不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响 25
3.1 材料与方法 25
3.1.1 试验材料 25
3.1.2 试验试剂 25
3.1.3 仪器设备 26
3.1.4 试验方法 26
3.1.5 试验参数测定 27
3.1.6 统计分析 29
3.2 结果与讨论 29
3.2.1 不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性的影响 29
3.2.2 不同预处理对哈密瓜片色泽和维生素 C 含量的影响 30
3.2.3 不同预处理对哈密瓜片质构特性的影响 31
3.2.4 不同预处理对哈密瓜片复水比的影响 32
3.2.5 不同预处理下的水分有效扩散系数与干燥数学模型研究 33
3.2.6 不同预处理下哈密瓜干制品的综合评分 34
3.3 本章小结 35
第 4 章 超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺优化 36
4.1 材料与方法 36
4.1.1 试验材料 36
4.1.2 试验试剂 36
4.1.3 仪器设备 37
4.1.4 试验方法 37
4.1.5 试验参数测定 38
4.1.6 统计分析 39
4.2 结果与讨论 39
4.2.1 干燥温度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响 39
4.2.2 切片厚度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响 40
4.2.3 超声处理时间对哈密瓜片干燥特性和品质的影响 41
4.2.4 响应面优化设计与试验 42
4.2.5 工艺参数验证与对比试验 47
4.3 本章小结 48
第 5 章 结论与展望 50
5.1 结论 50

5.2 展望 51
参考文献 53
致谢 59
作者简介 60
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表 61

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

哈密瓜（Hami-melon）是葫芦科黄瓜属甜瓜亚属，一年生草本植物，我国新疆地区的特色果品之一，素被誉为“瓜中之王”，在新疆各地有着悠久的种植历史和丰厚的历史文化底蕴，深受广大消费者的喜爱[1]。新疆地区拥有的光照时间长、昼夜温差大等优越的地理气候条件，使得新疆哈密瓜的品质特性极佳，口感脆爽、风味独特、甘甜如饴，其含有的丰富的维生素 C（Vitamin C, Vc）、类胡萝卜素、类黄酮等抗氧化物质，能够抑制生物分子氧化，防止或修复氧化性损伤对人体细胞造成的伤害，同时富含大量的钙、铁、钾、磷等矿物元素和丰富的膳食纤维，食用后对身体健康有着极大的益处[2]。目前各种植生产地根据所种植哈密瓜成熟的先后顺序，分别形成了以吐鲁番地区、哈密地区、喀什地区为核心的早熟、中熟、晚熟三大产区。近年来随着优良品种的培育更新，新疆地区哈密瓜产业迅速发展壮大，据新疆统计年鉴数据显示，新疆地区哈密瓜种植面积已达 62.65 千公顷，年产量已升至 221.66 万吨[3]。

新疆各地的哈密瓜采收期集中，在被采收后，大部分直接在田间进行包装，销售前还要经长时间、长距离的运输。采摘、包装、储运等环节易使哈密瓜受到机械损伤，导致微生物感染，使大量的哈密瓜因腐烂变质而损耗。同时新鲜哈密瓜水分较多，含糖量高，对温度十分敏感，不易保存，极易受温度、季节等不利因素的影响，导致腐烂造成大量的浪费和经济损失[4]。因此，探究科学有效的采后加工贮藏方式势在必行，将哈密瓜干制是解决上述问题的重要手段之一，通过去除水分可抑制微生物的繁殖生长以及相关酶的不良化学反应，减少哈密瓜的损失浪费，对丰富产业结构、推动哈密瓜产业发展具有重要意义[5]。同时将哈密瓜干制能够大幅度减少其体积和重量，降低运输、贮藏和包装成本，延长货架期，还可以赋予干制品独特的风味，开发多元化的产品提高市场竞争力[6]。

目前，食品果蔬干制加工所采用的各单一干燥形式均存在诸多不足，例如耗时长能耗高、加工后干制品易发生品质劣变等问题[7]。如何减少干燥耗时、降低干燥过程中物料营养物质的损失、提升干制品品质已成为哈密瓜干燥产业面临的重要问题[8]。干燥预处理，如超声处理、渗透处理、烫漂处理等已成为提高干制品品质的主流方法，适当的预处理能够减少初始水分含量、改变物料组织结构和抑制生物酶活性，对干制产品品质有着直接的影响[7]。研究人员尝试了超声、渗透、烫漂以及高压等预处理方式，发现预处理可以改变物料（胡萝卜[9,10]、苹果[11]、火龙果[12]、猕猴桃[13,14]）的微

观组织结构，减少水分扩散溢出的阻力，从而提高干燥效率，缩短干燥过程，并使得干制品获得更好的质构特性、色泽品质、复水性以及营养成分的保留率，最终达到改善产品品质和降低能耗的目的。

综上所述，本论文研究以寻找探究最适合的哈密瓜干燥工艺为目标，根据哈密瓜片干制加工技术的国内外研究现状，对比研究评价各典型的哈密瓜片干燥技术与常用的干燥预处理方式，将预处理应用至哈密瓜片的干制加工中，优化加工工艺，为哈密瓜片干制加工的提质增效提供技术和理论参考。

1.2 干燥及干燥预处理技术

1.2.1 干燥技术研究进展

冷冻干燥（Freeze Drying，FD）利用水冻结升华的原理，使冻结物料中的水在低温真空环境下被去除。FD 产品品质好，利用 FD 干制果蔬时，能够在最大程度上保留其含有的营养物质以及感官品质，可满足高标准的生产要求[15]。

高静静等[16]利用 FD 干制哈密瓜片时发现，哈密瓜中所含的总糖、总酚、总黄酮得到了较好的保留，微观组织结构观察结果显示，干制品细胞框架保持较好，出现了多孔道结构，同时具有较好的复水性；赵艳雪等[17]研究了不同切片厚度下山楂片的冷冻干燥动力学与品质特性，发现厚度为 3 mm 时，产品的抗坏血酸含量、质构以及色泽品质最优，厚度为 6 mm 时，产品在收缩率、复水比以及总酚含量等品质方面表现最好，数学模型拟合对比结果表明 Page 和 Lewis 模型能够较好的描述山楂片 FD 过程的水分变化规律；陈佳楠[18]对 FD 干制菠萝片的干燥特性及品质进行研究时发现，FD 菠萝干制品的可溶性固形物和抗坏血酸含量、色泽等品质较佳，FD 过程的降温速率对产品的水分含量、复水比和硬度有显著影响，降温速率越快其产品品质越佳；QUISPE 等[19]以马基莓为原料，进行了不同干燥方法对其干制品品质的影响试验，对比研究得出结论，FD 产品中的酚类化合物和抗氧化化合物含量最高，较鲜果相比，可保留 73%的花翠素和 64%的花青素，产品品质最佳，抗氧化能力最强。但由于 FD 设备昂贵、技术工艺复杂、能耗高等缺点，在实际生产应用中受到较多限制。

红外干燥（Infrared Drying，IRD）利用红外辐射传热直接加热物料，进而完成对物料的干燥。工作时，红外线作为一种电磁波，可快速穿透物料表面对其内部进行加热，内部温度高于其表面温度，使得物料内温度梯度与其内部水分迁移的湿度梯度方向相一致，促进水分迁移，同时随着迁移到表面水分的不断蒸发，进一步加快了物料干燥全过程[20]。

武华文[21]利用远红外干燥技术处理哈密瓜片时得出，其最佳工艺参数是干燥温

度 60 ℃、切片厚度 4 mm 和装载量 170 g，并研究建立其干燥过程的数学模型，得出 Page 方程拟合度最高，能够较好的描述其干燥过程；Chen 等[22]研究了中短波红外干燥对胡萝卜片干燥特性及品质的影响，发现干燥时间和干燥温度对胡萝卜片水分含量、色泽、营养元素含量等影响显著，经响应面法优化得出最佳工艺条件为干燥温度 70 ℃、红外功率 1125 W、干燥时间 50 min，此条件下产品的复水比（6.89）和β-胡萝卜素含量（462.48μg/g）分别为热风干燥的 1.45 倍和 1.15 倍；Shi 等[23]分析比较了红外干燥和热风干燥对香蕉切片干燥特性及品质的影响，结果表明，红外干燥可以显著缩短香蕉片的干燥过程，较高的红外温度可加速脱水速率，微观组织结构观察显示，红外干燥使香蕉片内部产生了多孔结构，同时高温使香蕉片表面产生大量的微通道，减少了内部水分向外迁移扩散的阻力，加速了干燥过程。IRD 因其有着干燥速率快、污染小、设备建造简便等优点，非常适用于以薄片形式进行干燥的物料，目前，在果蔬干燥和食品加工中获得了越来越多的应用[24]。

热风干燥（Hot Air Drying，HAD）以空气作为干燥介质，被加热后的空气与物料产生热交换，使物料升温促进其内部水分迁移扩散，同时带走蒸发出的水分，又可进一步促进干燥过程[25]。

张雪波等[26]利用 HAD 干制哈密瓜，得出其最佳热风干燥工艺为热风温度 55 ℃、热风速度 2.0 m/s、切片厚度 6 mm，干燥动力学模型研究结果表明，Page 模型最适于评估和预测哈密瓜切片的热风干燥过程；王莹等[27]研究了不同干燥温度下平母贝的热风干燥特性，并建立了相对应的干燥动力学模型，发现随着干燥温度的升高其水分有效扩散系数逐渐增大，干燥温度对平母贝的干燥过程影响显著，对干燥曲线进行非线性拟合的结果显示，Weibull 模型能够较好的描述平母贝 HAD 过程的水分变化规律；高静静等[16]研究 HAD 哈密瓜片时发现，其产品的细胞和细胞壁有较大的折叠，整体微观结构更加塌陷，香气化合物相对含量较大，产生的香气物质峰面积较大，综合考虑品质与成本，HAD 相较于 FD 更适用于哈密瓜片的干制加工；MICHALSK 等[28]研究对比了不同干燥方式对黑加仑粉干燥特性以及品质的影响，结果表明，HAD 干制品的水分活度最低，干燥过程中的脱水效率最高，但与其他干燥方式相比，其产品的孔隙率较高，粉末溶解度较低。HAD 技术虽然干燥时间较长，产品质量一般，但由于其成本低、易操作的特点，目前，仍是果蔬干制加工最常用的干燥技术。

微波真空干燥（Microwave Vacuum Drying，MVD）利用介电加热原理，将电磁波直接作用于物料，使其内部水分子相互摩擦碰撞产生热量，同时处于真空环境中的水极易达到沸点而蒸发，因此 MVD 可在较短的时间内完成干燥过程且对物料有着一定的膨化效果[29]。

金敬红等[30]的研究表明，MVD 是一种较佳的哈密瓜干制方法，该方法不仅可以大大缩短哈密瓜的干燥周期，还可以彻底解决微生物超标问题，且其生产成本较低；

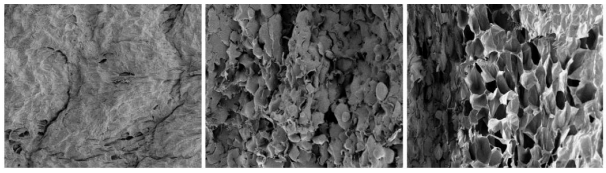
王亚娟等[31]利用 MVD 干制胡萝卜片，分析研究不同功率密度下胡萝卜片的干燥特性，微波功率密度越大，MVD 干燥过程越短，但其干制品品质也随之变差，易发生焦糊，利用遗传算法优化得出最新工艺参数，使干燥过程更易控制，干制品品质提升且效率提高 4.7 倍；Magdalena 等[32]研究了不同干燥方法（FD、HAD、MVD）对蔓越莓干制品品质的影响，结果表明，MVD 产品的品质最佳，当微波功率相对较低时，蔓越莓干中生物活性化合物的含量较高，其色泽品质以及抗氧化活性均优于其他干燥方法；Zhao 等[33]利用 MVD 干制处理可食用菌时发现，与单一连续 MVD 干燥相比，回火辅助 MVD 可有效缩短干燥过程，提升产品品质，新工艺对产品的复水比、多糖含量以及色泽品质等均有显著影响，各品质均优于单一连续 MVD 干燥产品。目前，MVD 因其效率高、操作简便、干净卫生等优点，在各类食品果蔬干制加工中有着越来越多的应用。

1.2.2 干燥预处理技术研究进展

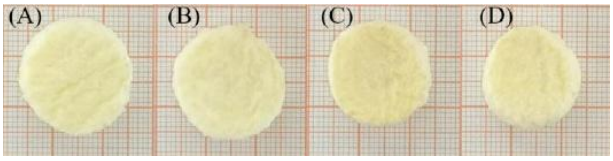
果蔬干制加工中的单一干燥形式存在诸多不足，加工后干制品极易发生品质劣变。如何降低干燥过程中物料的营养物质损失、提升产品感官品质、加速物料的干燥过程已是干燥行业所面临的主要问题，超声处理、烫漂处理、渗透处理等预处理技术已成为缩短干燥过程、提高干制品品质的主流方法，在食品果蔬干制加工中获得了越来越多的应用[11,13,34,35]。



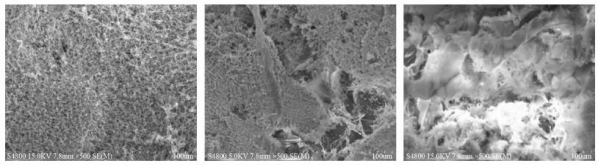
a. 不同预处理下的猕猴桃热风干制品
（自左至右分别为对照组、渗透处理、浸渍处理、烫漂处理）



b. 不同预处理对热风干制蒜片微观结构的影响
（自左至右分别为对照组、超高压处理、超声处理）



c. 葡萄糖渗透处理后的干制苹果片
（处理时间自左至右分别为 0min、30min、60min、180min）



d. 不同预处理对热风干制铁皮石斛微观结构的影响
（自左至右分别为剪切组、烫漂处理、冻融处理）

图 1-1 干燥预处理技术研究案例

Fig. 1-1 Research cases of drying pretreatment technology

超声处理（Ultrasonic treatment，UT）利用了超声波具有的空化效应、机械效应等，改变物料的内部组织结构，产生细胞微通道，使其结构更加通透，从而加快干燥过程中物料内部水分的迁移扩散与蒸发，加速干燥过程，提升产品品质[36]。

孟繁博等[12]研究发现，超声处理能有效缩短火龙果干燥时间，同时减少产品的

收缩率，降低色差，提升品质。张振亚等[37]研究发现，经超声处理后的菠萝片干燥时间至少缩短 30%，色泽、形态等品质显著提升。周峁等[38]研究发现经超声处理后，相较于对照组，苹果的真空冷冻干制品抗坏血酸含量更高，同时色差减小，产品的硬度值降低，干燥过程缩短了 22%。陈文敏等[39]利用红外联合超声处理干制红枣时发现，物料表面产生了大量裂缝，为水分扩散提供大量的通道，从而缩短干燥时间，相较于其他预处理方式，其产品色泽品质最佳，维生素 C、总酚等营养物质保留率最高；Ren 等[40]采用不同频率、处理时间、处理温度的超声波处理苹果切片，发现在 25 ℃、100 kHZ、5 min 的条件下，苹果片的真空冷冻干燥速率比对照组提高 25%，超声预处理可以显著缩短苹果片的干燥过程，提高产品的复水速率；ERHAN 等[41]以番茄为原材料，将超声预处理运用至番茄的热风微波联合干燥中，研究结果显示，经超声处理的番茄干燥时间缩短了 7.38%，番茄干制品总酚含量较高，颜色接近于新鲜番茄切片，色泽等外观品质较好。

烫漂处理（Blanching treatment，BT）是最常用的果蔬加工预处理方式，通过加热物料使其升温，破坏细胞膜、细胞壁结构使其松散，同时能够驱除物料内部组织间的空气、降低非酶褐变、减少微生物含量，从而加快其干燥速率，提升干制品品质。目前，主流的烫漂方式包括热水烫漂、蒸汽烫漂和微波烫漂等[42]。

王怡等[43]利用 HAD 干制百合，运用了微波烫漂预处理技术，研究不同微波功率、烫漂时间对其干燥特性的影响并建立了相应的干燥动力学模型，研究发现，随微波功率和烫漂时间的增加，干燥过程逐渐缩短，水分有效扩散系数也随之增加，活化能（23.68 kJ/mol）小于单一热风干燥，对干燥曲线进行非线性拟合的结果显示，Weibull 模型能够较好的描述百合烫漂处理后的 HAD 过程水分变化规律；魏明等[35]采用 90 ℃热水对铁皮石斛进行烫漂处理，发现其后续的干燥过程明显缩短，干燥能耗降低，烫漂预处理可使物料内部组织结构疏松，间隙增大，有效提高水分有效扩散系数，促进内部水分想表面迁移；张迎敏等[44]利用 HAD 干制红薯叶时发现，经烫漂处理后的产品叶绿素含量较高，色泽品质好，复水比较高，且干燥时间短；Ren 等[45]利用 HAD 干制洋葱时发现，经热水烫漂处理后洋葱的水分有效扩散系数明显提升，产品的酚含量、类黄酮含量较高，营养物质得到较好的保留；Liu 等[46]进行了百合鳞茎粉的干制试验，研究对比了热水烫漂和蒸汽烫漂对干制品品质和多酚氧化酶、过氧化物酶活性的影响，结果表明蒸汽烫漂能够较好的维护产品的色泽，抑制褐变，保持较高的亮度值，过氧化物酶因具有较高的耐热性，其活性可作为评价烫漂效果的指标，同时热水烫漂对两种酶活性的钝化效果要优于蒸汽烫漂。

渗透处理（Osmotic treatment，OT）是将物料浸入高渗溶液一段时间，使物料内外物质产生交换，从而去除其内部组织间部分水分的一种处理方式。越来越多的研究表明，渗透处理可以减少后续的干燥负荷，改善产品品质，缩短干燥过程并降低能耗，

目前最为常用的渗透溶质是糖和氯化钠[47]。

徐汝祯[13]将蔗糖溶液用于猕猴桃切片干制前的预处理，探究其对猕猴桃切片的干燥特性及品质的影响，结果表明，渗透处理能够缩短干燥过程，并显著降低干制品的色差值，维护猕猴桃鲜亮的色泽，但相较其他预处理，其干制品的维生素 C 含量较低；马有川[11]探究了不同种类的小分子糖对苹果切片干燥特性及品质的影响，结果显示，渗透处理增强了物料内水分子向外迁移的阻力，使得干燥速率明显降低，经渗透处理后，由于苹果片内部可溶性固形物的增加，导致其硬度值显著增大，但其色泽以及外观品质明显优于对照组，经对比，葡萄糖、蔗糖和果糖可作为渗透溶剂，有效改善干制品品质；Derossi 等[48]利用蔗糖、氯化钠以及盐糖混合溶液对圣女果进行渗透脱水处理，并采用响应面法确定出最佳工艺参数，研究表明，各渗透溶液均对产品的水分含量、水分活度以及色泽品质具有显著影响；Lyu 等[49]将渗透处理作为猕猴桃切片红外干燥的预处理方式，发现经高果糖玉米糖浆处理后的产品品质最好，渗透处理能够有效改善猕猴桃切片的干燥特性，经预处理后的猕猴桃切片干燥活化能为 29.51 kl/mol，产品色泽保持较好，抗坏血酸和叶绿素的保留率提高。

1.2.3 哈密瓜干燥及其预处理技术现状

哈密瓜通常以薄片的形式进行干制，在单一干燥过程中存在易褐变、营养物质损失严重等品质劣变问题，目前多种预处理已应用到哈密瓜片的干制加工中，加快其干燥过程，同时保证了产品较优的色泽、风味、品质。

毕金峰等[50]利用变温压差膨化干燥技术干制哈密瓜，探究烫漂处理、冷冻处理和渗透处理对产品各品质的影响，研究结果表明，适度的烫漂处理能够促进哈密瓜的干燥过程，并且获得产品的膨化度较好，低温冷冻预处理能够提高干制品的膨化度与脆度，但会使产品色泽品质变差，同时产品硬度变大，糖液渗透处理能够加速物料失水，有利于维护产品的色泽品质与外形的保持，高浓度的氯化钠渗透液能够显著增加产品的亮度，维持产品鲜亮的色泽；温馨等[51]采用热水烫漂（80、90、100 ℃，0.5~4 min）、蒸汽烫漂（0.5~4 min）、高压（100、200、300 MPa，1~9 min）处理哈密瓜，对比研究得出，最佳预处理工艺为蒸汽烫漂 1 min，产品硬度较对照组提高 7.6%，在钝化酶活性的同时可减少水溶性维生素 C 的流失；贾文婷等[8]对比研究了柠檬酸浸渍处理、烫漂处理、渗透处理对哈密瓜变温压差膨化干制品干燥特性及品质的影响，研究结果表明，柠檬酸浸渍可使物料软化，加速干燥时的脱水速度，同时可以降低产品硬度，提高膨化度与脆度，但较高浓度的酸会严重破坏哈密瓜的细胞组织结构，不利于维持色泽品质，烫漂处理能够加速物料的干燥过程，但过度的烫漂会增加产品的硬度，使产品亮度值下降，最佳的烫漂处理时间为 60 s，渗透处理可以使产品

的色泽品质显著提升，但较高浓度的渗透液会使干制品硬度增加，Nacl 渗透液的最佳浓度为 2%；崔彩云等[52]研究 FD 干制哈密瓜片工艺得出，其最佳工艺条件为切片厚度 10 mm、烫漂温度 95 ℃、烫漂时间 2 min，可得到感官品质与营养成分俱佳的优质产品；Gabriella 等[53]研究表明经超声处理的哈密瓜片水分扩散率增加约 25%，热风干燥过程缩短了 12.80%，所得干制品质地较软，色泽鲜亮，总类胡萝卜素含量较高，感官评价表明，经超声预处理的产品的整体接受度最高。

目前，针对不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性及品质影响的对比研究以及不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质影响的对比研究尚缺乏相关报道。

1.2.4 哈密瓜干制品各评价指标的选定

随着社会经济发展，人民生活水平提高，广大消费者对休闲零食的安全健康有了更高的要求，“吃饱的同时更要吃好”，开发高品质的哈密瓜干制产品意义重大[25,29]。哈密瓜片的干燥效率及干制品品质（加工品质、感官品质、营养物质）是评价产品品质优劣的重要指标[25]。目前我国还没有完备详细的干制哈密瓜片国家标准，故对其品质进行评价应参考前人相关研究以及结合其他果蔬干制品的相关评价标准，选定合理的评价指标，如下：

1.干燥时间

哈密瓜片干燥过程的耗时是衡量产品干燥效率的重要指标，较短的干燥时间对提高生产效率、提升干制品品质极为重要。Chang 等[6]研究哈密瓜红外热风联合干燥工艺时，将干燥时间作为评价工艺优劣的指标；马有川等[11]研究预处理对苹果片干后品质及能耗的影响时，将干燥时间作为评价指标之一。因此，本研究选定干燥时间作为评价指标。

2.色泽

干制品的色泽能够最直观地反映出其品质的优劣，直接影响到消费者的判断力与接受度，进而决定后续的购买行为[54]。贾文婷等[8]以色泽为评价指标，研究了不同预处理方式对哈密瓜变温压差膨化干燥的影响。戚思影等[55]研究超声预处理对香菇干后品质及风味的影响时，将色差值作为评价指标。本研究选定色差值为色泽评价指标，哈密瓜干制品的色差值越小，表明其外观颜色越接近于鲜样，色泽越鲜亮，产品品质好。

3.维生素 C 含量

哈密瓜含有丰富的维生素 C（Vitamin C，Vc），极易受周围环境的影响而分解，因此 Vc 通常被作为营养元素指示剂，干制品中的 Vc 能被很好地保留，那么其他营养成分也能的到较好的保留[56]。常安太等[25]在优化哈密瓜干燥工艺时，将干制品中

的 Vc 含量作为评价指标之一；Chen 等[57]利用多种干燥方式干制红枣片，以产品的 Vc 含量作为评价指标，得出结论 IRD 能更好的保留红枣中的 Vc，是最适合的红枣片干制方法。

4.质构特性：硬度、咀嚼性

哈密瓜片作为休闲零食，食用时口感的好坏是决定人们是否选择产品的重要因素。本研究利用质构仪模拟人咀嚼食物时口腔的动作，将哈密瓜片的感官品质量化，分析其内部组织结构变化评价其品质。常安太等[25]进行哈密瓜干燥工艺优化时，将硬度作为评价哈密瓜干制品品质的指标；苑丽婧等[14]研究猕猴桃热风干燥后的质构特性时，分别对硬度、咀嚼性等质构指标进行了研究；牛玉宝等[58]研究发现，随着干制过程中还原糖及总糖的损失以及水分的蒸发，到达干燥终点时物料的黏附性逐渐降低趋于 0。因此，通过对已有研究综合分析，本研究选定硬度、咀嚼性（硬度、内聚性和弹性三者乘积）为评价指标，较低的硬度和较小的咀嚼性表明哈密瓜片更易被咀嚼，口感更好，产品品质佳。

5.复水比

干燥后的哈密瓜片除直接食用，也常被用以制作果茶或进行其他精加工，因此研究产品的复水性有着重要意义。孟繁博等[12]研究预处理对热风干燥火龙果片品质的影响时，以复水比作为评价指标，同时表明复水比越高其干后品质越好。复水比能够表示产品浸水复原的能力，较好的复水性表明产品内部组织结构被破坏较轻，疏松多孔，干燥效果好，品质佳。

6.微观结构

干燥时，物料内部水分迁移扩散受微观组织结构的影响，进而影响其干燥效率。研究干制品的微观结构能够解释反映出其质构、复水性等指标参数，同时表明营养元素的损失情况[59]。Przybył等[60]研究也表明了，干制品微观结构呈现多孔、蜂窝状时，其拥有更优的品质。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究目标

为探究找寻最适合的哈密瓜片干燥工艺，根据哈密瓜片干制加工技术的国内外研究现状，对比分析四种典型的哈密瓜片干燥技术，同时为弥补单一干燥的诸多不足，对比研究了三种常用的干燥预处理方式，将预处理应用至哈密瓜片的干制加工中，加速干燥过程并减少其加工后产生的品质劣变，同时在单因素试验的基础上，对干燥工艺进行优化，进行对比研究验证新工艺的优势，为哈密瓜片干制加工的提质增效提供

技术和理论参考。

1.3.2 研究内容

1.不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性及品质的影响研究

通过对比分析冷冻干燥、红外干燥、热风干燥和微波真空干燥四种典型果蔬干燥技术对哈密瓜片干燥特性和品质的影响，综合评价不同干燥技术，选择确定一种合理的哈密瓜片干燥方法。

2.不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响研究

通过对比分析超声处理、烫漂处理和渗透处理对哈密瓜片红外干燥特性和品质的影响，对各预处理方式进行综合评价，选择哈密瓜片红外干燥合理的预处理方式。

3.超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺优化

超声处理时间是干燥工艺中重要的工艺参数，同时干燥温度和切片厚度也会影响物料的干燥时间、品质和营养物质的保留，为此进行单因素试验确定各影响因素的水平，运用响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计优化工艺参数，研究红外温度、切片厚度、超声处理时间以及三者的交互作用对干燥时间、色差值以及热敏性的营养元素指示剂维生素 C 含量的影响，得到较佳工艺参数并试验验证，并进行对比研究验证该工艺优势。

1.3.3 研究方法

1.不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性及品质的影响试验

对比研究 FD、IRD、HAD 和 MVD 四种典型果蔬干燥技术对哈密瓜片干燥特性和色泽、质构特性、复水比、微观结构等品质指标的影响，计算不同干燥方式下哈密瓜片的水分有效扩散系数，建立相对应的干燥动力学模型，最后通过变异系数法对不同干燥技术进行综合评分，确定一种合理的哈密瓜片干燥方法。

2.不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响试验

对比研究超声处理、烫漂处理和渗透处理对哈密瓜片红外干燥特性和色泽、维生素 C 含量、质构特性、复水比等品质指标的影响，计算不同预处理下哈密瓜片的水分有效扩散系数，建立相对应的干燥动力学模型，最后通过变异系数法对各预处理进行综合评分，确定哈密瓜片红外干燥合理的预处理方式。

3.Box-Behnken 中心组合设计响应面优化试验

通过单因素试验确定影响因素的水平，运用响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计优化工艺参数，研究红外温度、切片厚度、超声处理时间以及三者的交互作用对干燥时间、色差值、维生素 C 含量的影响，建立回归模型，确定各影响因素对各

评价指标的影响顺序，得到较佳工艺参数并试验验证。并对其干制品与未经超声处理的干制品的干燥时间和色差、维生素 C 含量、微观结构等品质指标进行对比分析。

1.3.4 技术路线

本文研究技术路线如图 1-2 所示：

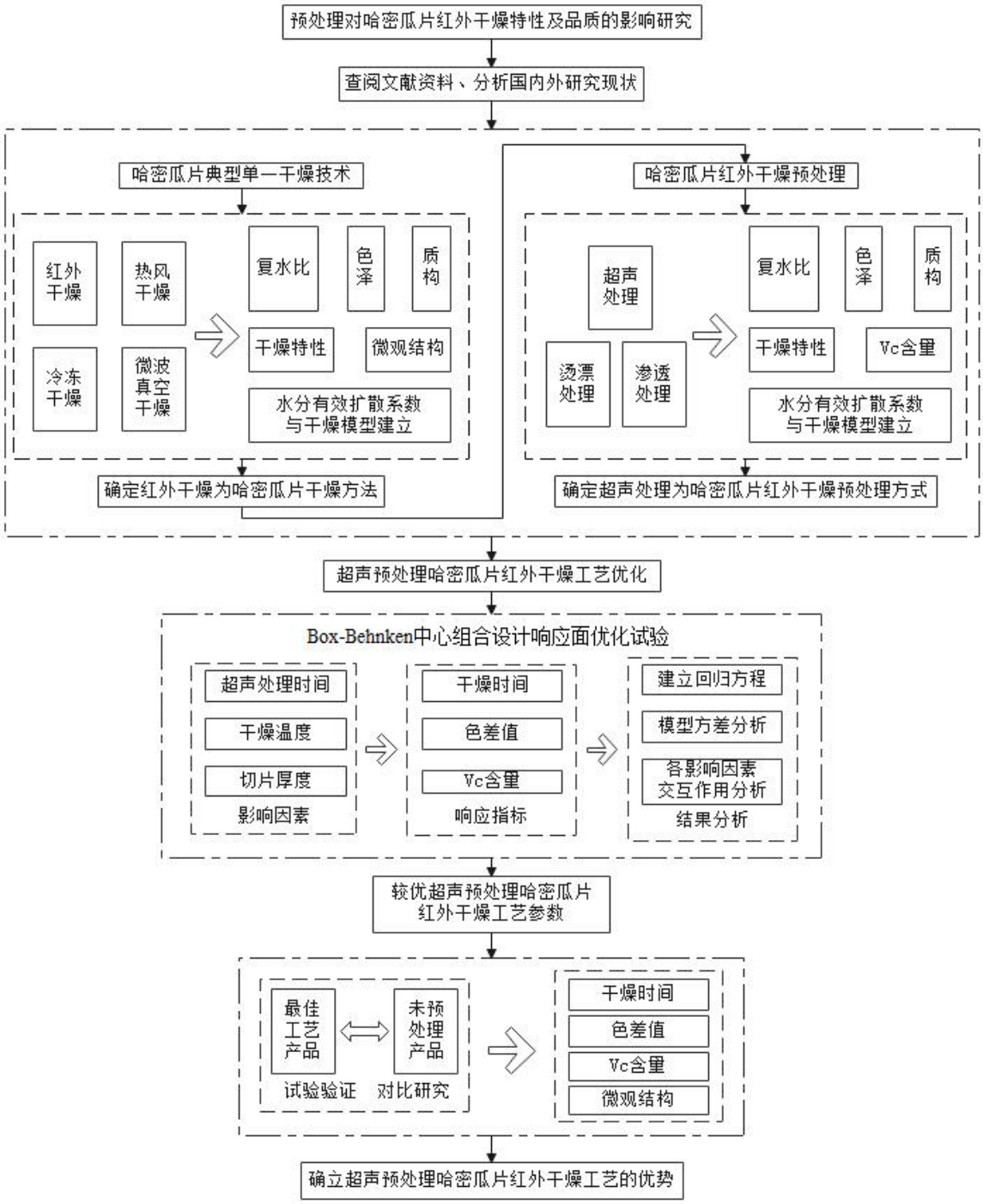


图 1-2 技术路线

Fig. 1-2 Technical route

1.4 本章小结

本章针对新疆哈密瓜干制加工环节中存在的干燥时间长与干制品品质劣变等问题，在对国内外相关技术研究现状综合分析的基础上，拟开展哈密瓜干燥及其预处理的试验研究。选定了哈密瓜干制品的评价指标，明确了全文的研究目标、研究内容、研究方法，确定了研究技术路线。拟定开展试验，研究对比四种典型的哈密瓜干燥技术，并在此基础上进一步开展对三种预处理方式的试验研究，以获得较优的干燥方法与干燥预处理方式；同时对新干燥工艺进行优化，并进行对比验证，为哈密瓜干燥加工的提质增效提供技术支持和理论参考。

第 2 章 不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性及品质的影响

哈密瓜口感脆爽、风味独特、甘甜如饴，且含有丰富的营养元素，素被誉为“瓜中之王”。哈密瓜在新疆地区拥有悠久的种植历史与文化底蕴，每年新疆各地都要种植、收获大量各品类的哈密瓜，其采收期集中，销售前还需经长时间、长距离的运输，因此极易受机械损伤、季节温度等不利因素的影响，出现腐烂变质的情况而造成大量的损耗浪费。将哈密瓜干制是解决上述问题的主要方法之一，干燥处理可防止霉变腐烂、延长货架期，同时能够增加产品的附加值，丰富产业结构。目前，多种干燥技术已应用至食品果蔬的采后加工中，不同物料所适用的干燥方法不同，因此寻找确定最适合哈密瓜的干燥方法和工艺要求十分重要[61]。

本章研究为探索最合理的哈密瓜片干燥方法，以西州蜜 17 号哈密瓜为原料，根据对国内外果蔬干制加工相关文献的综合分析，采用冷冻干燥（Freeze Drying，FD）、红外干燥（Infrared Drying，IRD）、热风干燥（Hot Air Drying，HAD）、微波真空干燥（Microwave Vacuum Drying，MVD）这四种最具代表性、最常用的干燥技术对哈密瓜进行干制加工，为评价产品优劣以及获得更好的感官品质以及加工品质，对哈密瓜片的干燥特性、色泽、质构特性、复水比以及微观结构进行了对比研究，最后通过变异系数法计算不同干制品品质的综合评分，确定最佳干燥方法。同时计算了各干燥方法下的水分有效扩散系数并建立了相对应的干燥动力学模型，为干制品干燥特性研究以及后续的工艺优化提供理论支撑。

2.1 材料与方法

2.1.1 试验材料

哈密瓜，西州蜜 17 号，初始含水率为 90.81%±0.85%（参考 GB5009.3-2016 中的直接干燥法进行测定）[62]。选择大小适中、无病虫害、表皮完好的哈密瓜，清洗去皮、瓤、头尾，从内向外切成长 6 cm、宽 3 cm、厚 7 mm 的长方形薄片。每次试验取(200±2) g 哈密瓜片进行干燥，试验目标干基含水率为 10%[63]。在试验期间，每 15 min 称取重量一次，当含水率达到目标要求时结束干燥。各组试验均重复 3 次，结果取平均值进行分析[56]。

2.1.2 仪器设备

DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱（上海一桓科学仪器有限公司，功率 1550 W）；RWBZ-08S 型微波真空干燥箱（南京苏恩瑞干燥设备有限公司，功率 800 W）；中短波红外干燥箱(圣泰科有限公司，功率 0~2 kW)；CHRIST ALPHA 1-2Ldplus 真空冷冻干燥机（德国 CHRIST 冻干机有限公司）；SMY-2000SF 型色差仪（北京盛名扬科技开发有限公司）；TA.XT plus 质构仪（英国 Stable Micro System 公司）；SU8010 场发射扫描电子显微镜（日立 Hitachi 公司）；600 型电动抽（充）气自动包装机（郑州九博机械设备有限公司）；电子天平（上海卓精电子科技有限公司，精确度 0.0001 g）。

2.1.3 试验方法

1.试验工艺流程：哈密瓜→拣选→冷藏（置于 4±1 ℃的冰柜，使水分分布均匀）→去皮、瓤→切片→干燥→封装→检测。

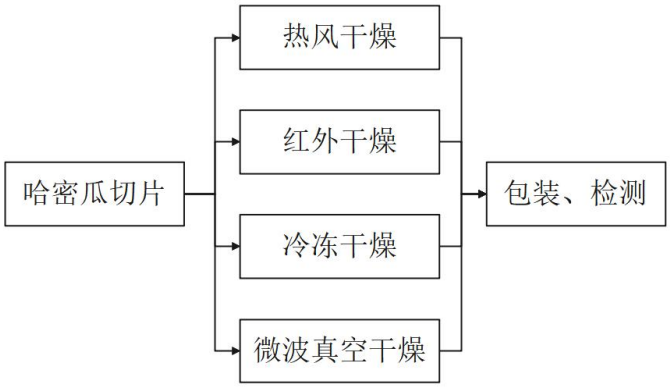


图 2-1 试验工艺流程图

Fig.2-1 The process flow path chant of experiments

2.设备参数：为寻找合理的干燥方式，参考相关研究报道，确定了四种有代表性的单一干燥技术，为了便于对比研究，根据预试验的较优结果及装备自身特点，在相同的设备设定温度下进行哈密瓜片干制试验，参数如表 2-1 所示[16,26,29,30]。

表 2-1 干燥方法及参数设定

Table 2-1 Drying method and parameter setting

干燥方法	参数设定
冷冻干燥	冷阱温度-40 ℃，加热板温度 60 ℃，干燥室压力 12 Pa
红外干燥	红外温度 60 ℃，功率 6.75 $W \cdot g^{-1}$
热风干燥	温度 60 ℃，风速 2.2 $m \cdot s^{-1}$
微波真空干燥	控制温度 60 ℃，功率 6.75 $W \cdot g^{-1}$

3.优选方法：采用变异系数法对不同干燥方法的哈密瓜干制品进行综合评分。按下式进行计算。

$$V_i = \frac{\sigma_i}{X_i} \quad (2-1)$$

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i} \quad (2-2)$$

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_i}{\sigma_i} \quad (2-3)$$

式中：V_i，第 i 项指标的变异系数；σ_i，第 i 项指标的标准差；X_i，第 i 项指标的平均值；W_i，第 i 项指标的权重；Z_{ij}，标准化后各指标变量值；X_{ij}，各指标的实际测量值。

计算时，数值越小越好的指标，标准化后需添负号，然后将标准化后的数值分别与权重相乘，计算总和，得到不同干燥方法的哈密瓜干制品的综合评分。

2.1.4 试验参数测定

1.含水率

干燥过程中哈密瓜片含水率计算公式如下[63]

$$W_t = \frac{m_t - m_d}{m_t} \times 100\% \quad (2-4)$$

$$w_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中 W_t、w_t 分别为任意干燥 t 时刻的湿基含水率和干基含水率，%；m_t 为哈密瓜片任意干燥 t 时刻的质量，g；m_d 为哈密瓜片的绝干质量，g。

2.水分比

在干燥过程中，哈密瓜片中的水含量用水分比（MR, moisture ratio）来表示，计算公式如下[63]

$$MR = \frac{w_t - w_e}{w_0 - w_e} \quad (2-6)$$

式中 w_0，w_e 和 w_t 分别为哈密瓜片初始、平衡时和任意干燥 t 时刻的干基含水率，%。

因为哈密瓜片的平衡含水率 w_e 远小于 w_0 和 w_t，所以公式可简化为[63]

$$MR = \frac{w_t}{w_0} \quad (2-7)$$

3.色泽

选取干燥后的典型样品，利用 SMY-2000SF 型色差仪，依据 CIELAB 表色系统测量其色度 L^*、a^*、b^*值。不同干制处理组与鲜样的色泽差异值ΔE按下式计算，ΔE 值越小说明产品色泽越鲜亮，色泽品质越好[64,65]

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (2-8)$$

式中 L^*、a^*、b^*为干制品明亮度、红绿值、蓝黄值；L^*_0、a^*_0、b^*_0为鲜样明亮度、

红绿值、蓝黄值。

4.质构特性

利用质构仪对不同干制处理的哈密瓜片进行硬度、咀嚼性的测定，每组样品重复测定 5 次[12,37]。探头：P0.5，全质构测定（texture profile analysis, TPA）模式，测定条件：测试速度 1 mm/s，测前速度 3 mm/s，测后速度 2 mm/s，测试距离 15 mm，压缩比 60%，触发力 1.5 N。

5.复水比

将干燥后的样品在 25 ℃的去离子水中浸泡 2 h，试验完成后，用厨房纸除去样品表面的游离水。复水比（Rehydration Ratio, RR）计算公式如下[59]

$$RR = \frac{m_r}{m_d} \qquad (2-9)$$

式中 m_d为复水前样品的重量，g；m_r为复水后样品的重量，g。

6.微观结构

选取干燥后典型样品，用液氮速冻处理后立即掰断，自然形成脆片横断面，作为观察样本，用碳导电胶将样本粘在样品托上，喷金，进行电子显微镜扫描，重复观察不同区域的组织结构并分析[66]。

7.水分有效扩散系数计算

迁移扩散是干燥时物料中水分的主要运动机制，在描述其水分扩散过程时，通常会考虑 Fick 扩散方程。水分有效扩散系数（Effective diffusivity coefficient，D_{eff}）可根据 Fick 扩散方程计算，公式如下所示[67-69]。

$$\frac{\partial M_t}{\partial t} = \nabla \cdot （D_{eff} \nabla M_t） \qquad (2-10)$$

公式（2-10）可通过考虑样品几何形状、初始干燥条件和边界条件来求解。因此，通过假设哈密瓜片具有均匀的初始含水量、恒定的扩散系数、忽略样品的收缩和外部传质阻力，不同样品的水分有效扩散系数可以用式（2-11）表示：

$$MR = \frac{8}{\pi^2} - \exp （\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t ） \qquad (2-11)$$

式中 D_{eff}为干燥过程中哈密瓜片的水分有效扩散系数，m^2/s；L为哈密瓜片的半厚度，m；t为哈密瓜片的干燥时间，s。

两边取自然对数得到公式（2-12）。

$$ln\, MR = ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \qquad (2-12)$$

8.干燥动力学模型建立

物料的干燥是一个较为复杂的变化过程，建立相对应的干燥数学模型能够在一定程度上描述其干燥过程，且对物料的干燥特性以及后续的工艺参数优化研究意义重大。

选取如下常用的 8 种经典干燥模型对哈密瓜的干燥曲线进行拟合，选取并建立最适合描述哈密瓜干燥过程的干燥动力学模型。

表 2-2 干燥模型及参数
Table 2-2 Drying models and their parameters

序号	名称	模型方程	参数	参考文献
1	Lewis	$MR=\exp(-Kt)$	K	[70]
2	Page	$MR=\exp(-Kt^n)$	K,n	[71]
3	Modified Page	$MR=\exp(-Kt)^n$	K,n	[22]
4	Logarithmic	$MR=a\exp(-Kt)+c$	K,a,c	[72]
5	Two-term	$MR=a\exp(-K_1t)+b\exp(-K_2t)$	K_1,K_2,a,b	[73]
6	Weibull	$MR=\exp(-(t/a)^b)$	a,b	[74]
7	Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-Kt)$	K,a	[74]
8	Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$	a,b	[26]

各模型拟合效果的优劣使用决定系数（correlationcoefficient，R^2）、卡方检验值（reducechi-square，χ^2）、均方根误差（rootmeansquareerror，$RMSE$）3 个参数来进行评判。决定系数R^2常被用作于衡量反映模型预测值和实际测量值各变量之间的一致程度与密切关系，其值越接近于 1，表明各变量的关系越密切，一致程度越高；卡方检验值χ^2被广泛的用于表明试验统计样本的实际测量值与模型预测推断值之间的差异程度，从而反映出各数据间的实际差异，其值越低，表明模型的拟合程度越优；均方根误差$RMSE$是实际测定值与预测推断值偏差的平方和与观测次数 N 比值的平方根，反映出各变量之间的精度差异和一个数据集的离散程度，$RMSE$值越小，表明模型拟合效果越好[70]。

以上 3 个统计学指标的计算如公式（2-13）、（2-14）和（2-15）所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pre,i} - MR_{exp,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i}\right)^2} \quad (2-13)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}\left(MR_{pre,i} - MR_{exp,i}\right)^2\right]^{1/2} \quad (2-14)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right)^2}{N-n} \quad (2-15)$$

式中：$MR_{exp,i}$为干燥试验测得的第i个水分比；$MR_{pre,i}$为模型预测的第i个水分比；N与 n 分别为试验测得的数据组数和模型中常数的个数。

2.1.5 统计分析

数据统计分析采用 SPSS 26.0 软件，均采用平均值，采用单因素方差分析

（ANOVA）方法进行差异显著性分析，水平为 0.05。绘图采用 Origin 2021 软件。

2.2 结果与分析

2.2.1 不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性的影响

通过分析对比不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性的影响，进而评判各干燥技术的优劣，不同干燥方法下哈密瓜片的干燥曲线如图 2-2 所示。由图可知，哈密瓜片的各干燥方法均为降速干燥，FD 组干燥过程耗时最长，原因是 FD 后期物料中的水分减少，干燥进入解析干燥阶段，水分去除较为缓慢，干燥后期占总时长的一半，总干燥过程耗时为 745 min[75]。HAD 组干燥中后期，哈密瓜片表面出现硬化结壳的现象，致使水分向外迁移扩散时所受阻力增大，导致干燥耗时较长为 345 min[76]。IRD 组耗时较短，为 240 min，由于红外辐射加热的穿透性，干燥过程没有明显的缓慢变化段[56]。MVD 组耗时 36 min，此时物料处于真空的干燥环境中，水分更易达到沸点蒸发，同时由于微波的选择性加热和较强的穿透力，干燥时物料中的水分迁移扩散迅速，因此干燥过程耗时最短[77]。

综上所述，在保证干燥品质的前提下，可选择 IRD 或 MVD 为较优的哈密瓜片干燥方法。

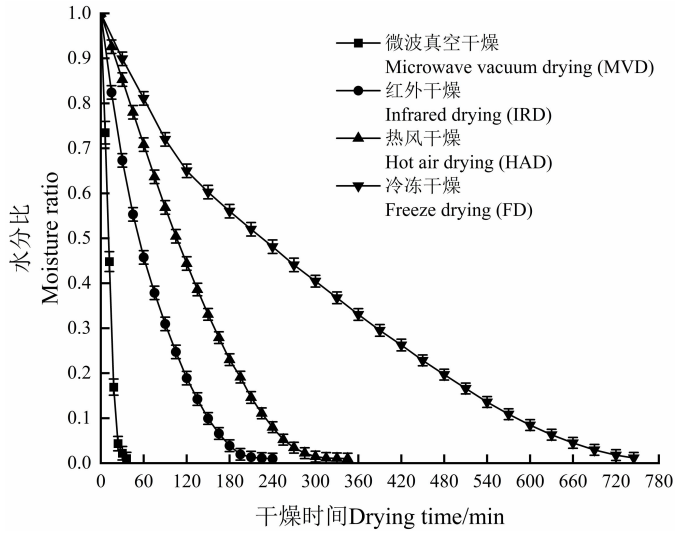


图 2-2 不同干燥方法下哈密瓜片的干燥曲线

Fig.2-2 Drying curves of Hami-melon slices under different drying methods

2.2.2 不同干燥方法对哈密瓜片色泽的影响

色泽是被用来评判干制品品质优劣的重要指标之一，不同干燥方法下哈密瓜片的色差值如图 2-3 所示，色差值越小说明产品色泽越鲜亮，色泽品质越好[56]。FD、IRD、HAD 和 MVD 组产品色差值分别为 13.25、17.23、20.67、19.12。FD 产品亮度高，色

泽接近鲜样，色差值最小。哈密瓜片在有氧环境中被加热干燥时，会发生酶促反应和非酶促反应，产生褐变[78]。IRD、HAD 和 MVD 产品相较 FD 产品色差值增大，这表明 IRD、HAD 和 MVD 产品的色泽品质低于 FD 产品。HAD 和 MVD 产品内部发生较强烈的美拉德反应，亮度较低，色差值大[24]。IRD 产品色泽虽然比 FD 差，但优于 HAD 和 MVD 产品。

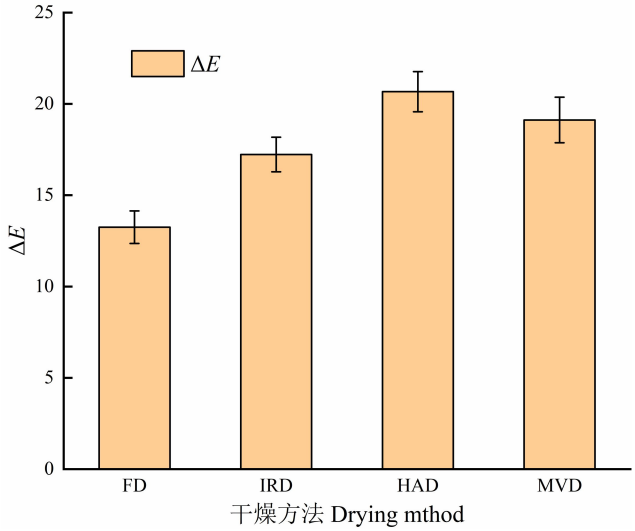
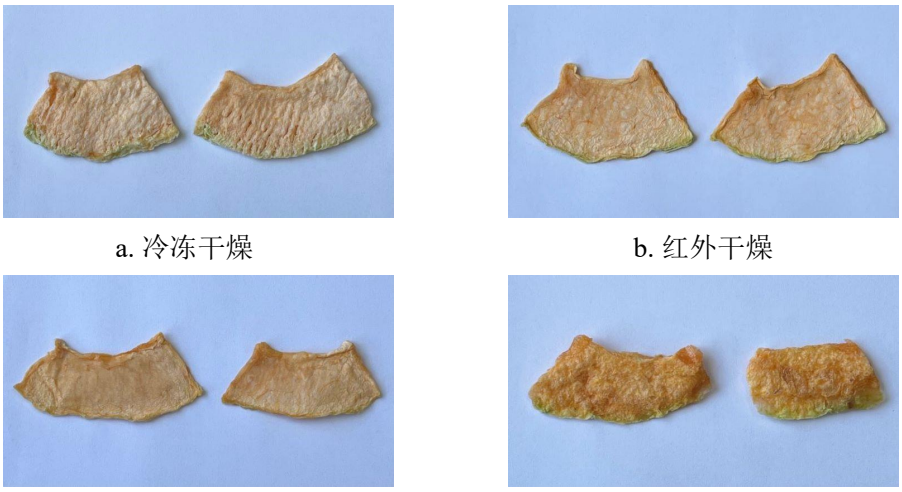


图 2-3 不同干燥方法对哈密瓜片色泽的影响

Fig.2-3 Effects of different drying methods on the color of Hami-melon slices



a. 冷冻干燥　　b. 红外干燥

c. 热风干燥　　d. 微波真空干燥

图 2-4 不同干燥方法的哈密瓜干制品

Fig.2-4 Different drying methods of Hami-melon dry products

2.2.3 不同干燥方法对哈密瓜片质构特性的影响

硬度、咀嚼性作为描述干制品质构品质的典型参数，可反映出干制品的食用口感，较低的硬度和咀嚼性表明产品质构品质较优，哈密瓜片可以被轻松的咀嚼食用[58]。不同干燥方法所得产品的硬度、咀嚼性如图 2-4 所示，硬度大小依次为 MVD、HAD、IRD、FD，分别为 132.58 N、89.98 N、49.76 N、32.01 N，咀嚼性大小依次为 MVD、

HAD、IRD、FD，分别为 52.38、40.87、30.18、7.53。FD 产品质地绵软，硬度与咀嚼性都最优；IRD 产品硬度适中，咀嚼性较好，红外干燥时哈密瓜片表层水分蒸发较快，易产生孔隙，形成疏松多孔结构。物料内孔隙的变化进一步造成了质构特性的变化，影响了哈密瓜片的硬度与咀嚼性[29]；HAD 产品由于较长的干燥时间，表面收缩结壳，硬化严重，咀嚼性差；MVD 产品硬度大，咀嚼性差，这可能是由于干燥后期因物料含水较少，局部温度过高导致了结构硬化，甚至会产生焦糊等现象[56]。

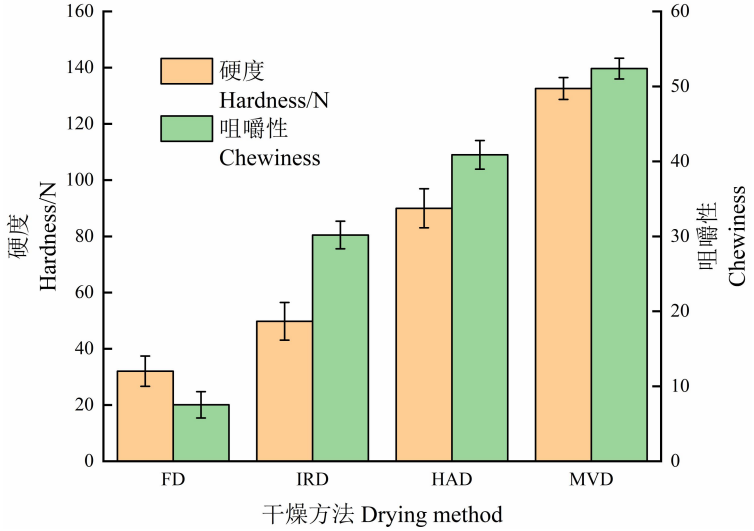


图 2-5 不同干燥方法对哈密瓜片质构特性的影响

Fig.2-5 Effects of different drying methods on the texture of Hami-melon slices

2.2.4 不同干燥方法对哈密瓜片复水比的影响

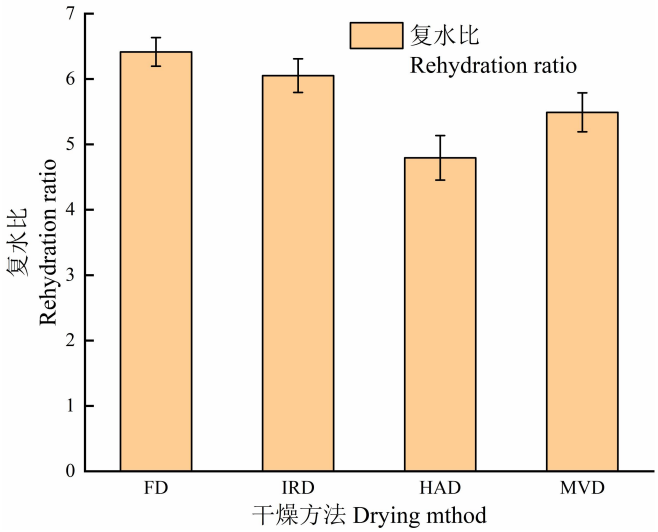


图 2-6 不同干燥方法对哈密瓜片复水比的影响

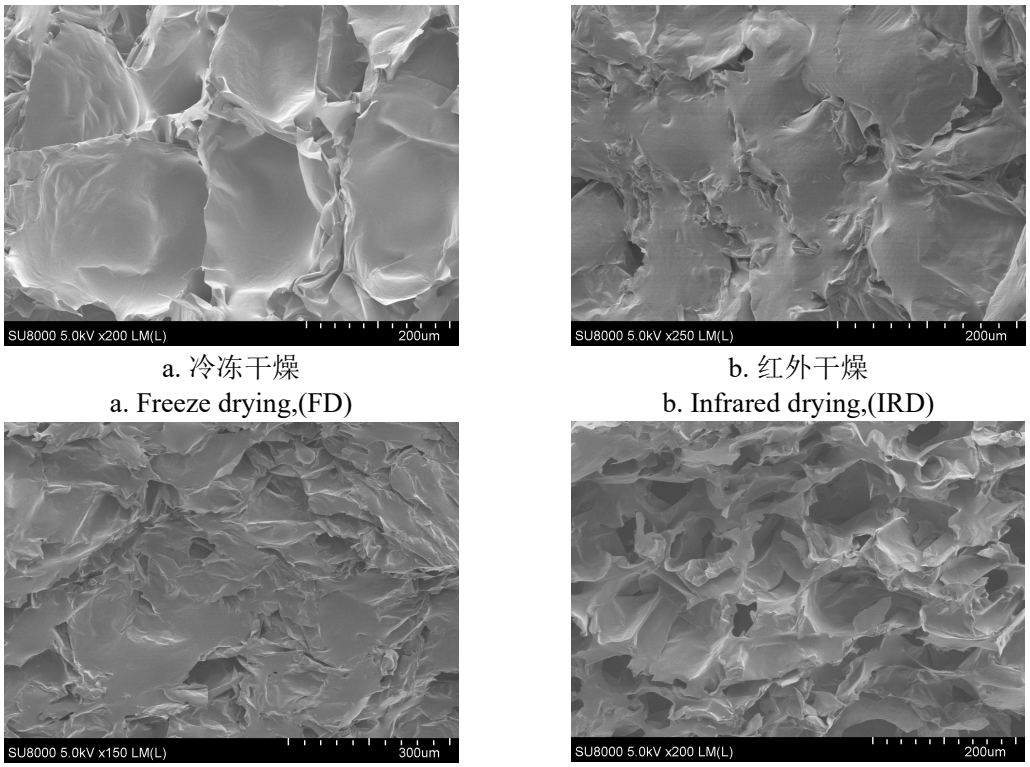
Fig.2-6 Effects of different drying methods on the rehydration ratio of Hami-melon slices

复水比是考查干燥产品内部品质的重要指标，表示产品浸水复原的能力，较好的复水性表明产品内部组织结构被破坏较轻，疏松多孔，干燥效果好，品质佳较[37]。由图 2-5 可知，FD、IRD、HAD 和 MVD 组产品复水比分别为 6.42、6.05、4.79、5.49。

FD 产品具有最高的复水比，IRD 和 MVD 次之，而 HAD 产品的复水比较低。FD 全程升华脱水，内部形成多孔结构，复水比最高[15]；IRD 由于一定程度的膨化作用，使得其产品复水性较好[24]；MVD 产品干燥时，内部的高压使其自身产生膨胀，形成的多孔结构可增强其复水能力[56]。HAD 产品复水比最低，原因是长时间的干燥使表面硬化结壳，内部结构破坏严重，导致复水能力差[29]。

2.2.5 不同干燥方法对哈密瓜片微观结构的影响

不同干燥方法下哈密瓜片微观结构电镜扫描图如图 2-6 所示。FD 干制时，水分有固态升华去除，因此内部组织保持较好，细胞结构完整，孔隙边界清晰[18]；IRD 样品内部细胞排列均匀，结构较疏松，是由于红外干燥物料所承受的热应力相对较小，细胞损伤小，且适当的红外辐射具有膨化作用[79]；HAD 样品表现为细胞和细胞壁较大的折叠，整体结构塌陷更加紧密，是由于较长的干燥时间较长，造成哈密瓜片表面结壳硬化严重[56]；MVD 由于微波的选择性加热和较强的穿透力，干燥时使物料中的水分急速蒸发，使细胞在干燥过程中破碎，破坏程度较大[77]。



a. 冷冻干燥
a. Freeze drying,(FD)

b. 红外干燥
b. Infrared drying,(IRD)

c. 热风干燥
c. Hot air drying,(HAD)

d. 微波真空干燥
d. Microwave vacuum drying,(MVD)

图 2-7 不同干燥方法的哈密瓜片微观结构
Fig.2-7 Microstructure of Hami-melon slices with different drying methods

2.2.6 不同干燥方法下的水分有效扩散系数与干燥数学模型研究

水分有效扩散系数是表示样品水分扩散能力大小的一个参数，同时也是工艺优化的重要参考，可反映不同干燥过程中样品的干燥速率大小，水分扩散系数越大则干燥速率越快[25]。由于哈密瓜片的干燥过程为降速干燥，其整个干燥过程由内部水分扩散控制，因此可以使用 Fick 第二定律来描述干燥过程中水分的扩散规律，计算相应的水分有效扩散系数。不同干燥方法的 lnMR 线性拟合方程和水分有效扩散系数如表 2-3 所示。各拟合方程的决定系数R^2在 0.90224~0.97324 之间，表明拟合效果较好，冷冻干燥、热风干燥、红外干燥、微波真空干燥的 D_{eff}依次增大，分别为 4.23×10^{-10}、1.20×10^{-9}、1.69×10^{-9}、1.14×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$，符合食品物料干燥时有效水分扩散系数 10^{-10}~$10^{-8}m^2\cdot s^{-1}$ 的数量级范围[80]，也表明 MVD、IRD 拥有较快的干燥速率。

表 2-3 不同干燥方法下的水分有效扩散系数

Table 2-3 The effective diffusion coefficient of water under different drying methods

干燥方法	线性拟合方程	决定系数 R^2	水分有效扩散系数 D_{eff}/($m^2\cdot s^{-1}$)
冷冻干燥	$lnMR=-8.51\times10^{-5}t+0.4$	0.90224	4.23×10^{-10}
红外干燥	$lnMR=-3.41\times10^{-4}t-0.41499$	0.96262	1.69×10^{-9}
热风干燥	$lnMR=-2.41\times10^{-4}t-0.64009$	0.93951	1.20×10^{-9}
微波真空干燥	$lnMR=-2.29\times10^{-3}t-0.41535$	0.97324	1.14×10^{-8}

为研究哈密瓜片在不同干燥方法下的干燥特性，模拟其干燥过程，了解其干燥时的脱水规律，选取了常用的 8 种经典干燥模型，采用 Origin 软件对哈密瓜片的干燥曲线进行非线性曲线拟合、分析。各模型拟合效果的优劣利用决定系数R^2、卡方检验值χ^2、均方根误差 *RMSE* 这 3 个参数来进行评判，R^2越接近于 1，χ^2和 *RMSE* 越小，则表明模型的拟合效果越优，与哈密瓜片的干燥过程越吻合。

不同干燥方法的数学模型拟合结果如表 2-4 所示。FD 过程水分比随时间变化的干燥曲线与各数学模型的非线性拟合结果显示，只有 Weibull 和 Wang and Singh 模型的R^2高于 0.9，其值分别为 0.98568、0.98792，这表明以上 2 个模型可以被用来描述哈密瓜片 FD 过程的脱水规律，相较于 Weibull 模型，Wang and Singh 模型的 *RMSE* 和χ^2值更小，分别为 0.03175 和 1.01×10^{-3}，说明其模拟精度更高，更适用于模拟哈密瓜片 FD 干燥过程；IRD 过程水分比随时间变化的干燥曲线与各数学模型的非线性拟合结果显示，各模型的R^2均高于 0.99，Page、Logarithmic 和 Weibull 模型的R^2值较高，分别为 0.99597、0.99877 和 0.99597，其中 Logarithmic 模型的 *RMSE*、χ^2值均最小，分别为 0.01085、1.178×10^{-4}，说明其模拟精度高于其余模型，能更好地描述哈密瓜片 IRD 过程的脱水规律，模拟哈密瓜片 IRD 干燥过程；HAD 过程水分比随时间变化的干燥曲线与各数学模型的非线性拟合结果显示，Page、Weibull 和 Wang and

Singh 模型的R^2值较高，分别为 0.99567、0.99548、0.99827，其中 Wang and Singh 模型的 *RMSE*、χ^2值均最小，分别为 0.01357 和 1.842×10^{-4}，说明其模拟精度高于其余模型，能更好地描述哈密瓜片 HAD 过程的脱水规律，模拟哈密瓜片 HAD 干燥过程；MVD 过程水分比随时间变化的干燥曲线与各数学模型的非线性拟合结果显示，Page 和 Weibull 模型的R^2值最高均为 0.99733，*RMSE*、χ^2值均最小分别为 0.02034、4.139×10^{-4}，表明可以采用 Page 和 Weibull 模型对哈密瓜片 MVD 干燥过程的水分比变化情况进行描述，模拟其干燥过程。

表 2-4 不同干燥方法的干燥数学模型拟合结果

Table 2-4 Drying mathematical model fitting results of different drying methods

模型	干燥方法	模型常数	R^2	*RMSE*	χ^2
Lewis	FD	K=0.65514	-1.16202	0.42464	0.18032
	IRD	K=0.01396	0.99213	0.02743	7.525×10^{-4}
	HAD	K=0.00787	0.96242	0.06332	4.01×10^{-3}
	MVD	K=0.08227	0.9577	0.08097	6.56×10^{-3}
Page	FD	K=0.65514,n=0.88058	-1.25211	0.43339	0.18783
	IRD	$K=7.81\times10^{-3}$,n=1.12922	0.99597	0.01964	3.857×10^{-4}
	HAD	$K=9.18\times10^{-4}$,n=1.4292	0.99567	0.02197	4.827×10^{-4}
	MVD	K=0.01419,n=1.65864	0.99733	0.02034	4.139×10^{-4}
Modified Page	FD	K=0.65514,n=0.65514	-1.25211	0.43339	0.18783
	IRD	K=0.01198,n=1.16497	0.99161	0.02833	8.027×10^{-4}
	HAD	$K=6.99\times10^{-3}$,n=1.1255	0.96242	0.06475	4.19×10^{-3}
	MVD	K=0.07327,n=1.12278	0.94924	0.08869	7.87×10^{-3}
Logarithmic	FD	K=1.94696,a=0.66265,c=0.33735	0.13315	0.26888	7.23×10^{-2}
	IRD	K=0.01172,a=1.0747,c=-0.07623	0.99877	0.01085	1.178×10^{-4}
	HAD	K=1.39261,a=0.68126,c=0.31871	0.10327	0.30933	9.568×10^{-2}
	MVD	K=0.05999,a=1.21868,c=-0018274	0.97136	0.06663	4.44×10^{-3}
Two-term	FD	$K_1=-4.463\times10^{16}$,$K_2=-1.296\times10^{15}$ a=0.22763,b=0.77237	-1.45685	0.45266	0.20491
	IRD	K_1=84.0854,K_2=0.01472 a=-0.05712,b=1.05712	0.99231	0.02712	7.354×10^{-4}
	HAD	K_1=9.00959,K_2=0.00904 a=-0.15738,b=1.15738	0.97511	0.05153	2.66×10^{-3}
	MVD	K_1=7.28869,K_2=0.11637 a=-0.52305,b=1.52305	0.98027	0.0553	3.06×10^{-3}

Weibull	FD	a=298.82,b=1.10694	0.98568	0.03456	1.19×10^{-3}
	IRD	a=73.47419,b=1.12922	0.99597	0.01964	3.857×10^{-4}
	HAD	a=133.3355,b=1.4292	0.99548	0.02197	4.827×10^{-4}
	MVD	a=13.00967,b=1.65864	0.99733	0.02034	4.139×10^{-4}
Henderson and Pabis	FD	$K=-3.44512\times10^{11}$,a=1	-1.25211	0.43339	0.18783
	IRD	K=0.01429,a=1.0246	0.99236	0.02703	7.304×10^{-4}
	HAD	$K=8.57\times10^{-3}$,a=1.09522	0.97103	0.0556	3.09×10^{-3}
	MVD	K=0.08614,a=1.05816	0.95448	0.08399	7.05×10^{-3}
Wang and Singh	FD	$a=-2.51\times10^{-3}$,$b=1.62601\times10^{-6}$	0.98792	0.03175	1.01×10^{-3}
	IRD	$a=-9.84\times10^{-3}$,$b=2.44118\times10^{-5}$	0.99088	0.02954	8.723×10^{-4}
	HAD	$a=-5.67\times10^{-3}$,$b=7.96089\times10^{-6}$	0.99827	0.01357	1.842×10^{-4}
	MVD	$a=-0.05967$,$b=8.85779\times10^{-4}$	0.98901	0.04127	1.7×10^{-3}

2.2.7 不同干燥方法下哈密瓜干制品的综合评分

采用变异系数法确定各指标的平均值、标准差、变异系数及权重，结果见表 2-5。

表 2-5 不同干燥方法下各指标的权重

Table 2-5 Weight of each index under different drying methods

指标	平均值	标准差	变异系数	权重 (%)
干燥时间	341.5	298.025	0.873	37.113
色差值	17.568	3.204	0.182	7.755
硬度	76.085	44.796	0.589	25.038
咀嚼性	32.74	19.098	0.583	24.808
复水比	5.688	0.707	0.124	5.286

由表 2-6 可知，干燥时间、硬度和咀嚼性所占权重较大，表明哈密瓜干制品的干燥时间、硬度和咀嚼性受不同干燥方式的影响相对较大。根据不同干燥方式的哈密瓜片的各指标值及其权重，计算综合评分。各指标的标准化值及不同干燥方式的综合评分如表 2-6 所示。由表 2-6 可知，不同干燥方法中红外干燥的综合评分最高，因此，本试验研究中，红外干燥的哈密瓜干制品品质最好。

表 2-6 各指标的标准化值及综合评分

Table 2-6 Comprehensive score of dried seabuckthorn under different pretreatment methods

干燥方法	干燥时间	色差值	硬度	咀嚼性	复水比	综合评分	排名
冷冻干燥	1.563	-1.556	-1.136	-1.525	1.187	0.266	2
红外干燥	-0.393	-0.122	-0.679	-0.155	0.595	0.395	1
热风干燥	0.0135	1.118	0.358	0.492	-1.46	-0.381	4
微波真空干燥	-1.184	0.559	1.456	1.187	-0.323	-0.281	3

2.3 本章小结

本章以研究干燥技术为主，通过对比不同干燥方法（FD、IRD、HAD、MVD）对哈密瓜片干燥特性及品质（色泽、质构、复水比、微观结构）的影响，综合比较各干燥方法的优劣，确定了最适合的哈密瓜片干燥方法，同时研究计算了各干燥方法下的水分有效扩散系数并建立了相对应的干燥动力学模型，具体结论如下：

1）不同干燥方法耗时差异较大，各干燥过程均为降速干燥，在相同的温度水平下，FD 耗时最长为 745 min，干燥过程能耗极大，HAD 耗时 345 min，IRD、MVD 干燥过程的水分有效扩散系数较大分别为 1.69×10^{-9}、1.14×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$，干燥速率快，干燥耗时短分别为 240 min、36 min。干燥模型拟合结果表明，Wang and Singh 模型适用于模拟哈密瓜片 FD、HAD 干燥过程，Logarithmic 模型能更好地描述哈密瓜片 IRD 过程的脱水规律，Page 和 Weibull 模型适用于模拟哈密瓜片 MVD 干燥过程；

2）产品的色泽是消费者选购商品时考虑的首要因素，硬度、咀嚼性、复水性同样也是不容忽视的重要指标，IRD 产品的各品质均优于 HAD、MVD 产品，FD 产品品质最佳；微观结构观察结果显示，FD 较好的保持了产品的原有结构，IRD 对产品的细胞损伤较小且具有一定的膨化作用，HAD、MVD 对产品内部组织结构破坏较大。

综上所述，通过对各干燥方法的耗时、产品品质综合对比，IRD 综合评分最高，可在较短的时间内获得高品质的产品，因此确定红外干燥为哈密瓜片的干燥方法。

第 3 章 不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响

第 2 章研究结论表明，红外干燥在拥有较短干燥时间的同时能够保证较好的产品品质，因此其作为哈密瓜片干燥方式最为合理。但目前，单一干燥形式仍存在不足，加工后干制品易发生品质劣变。如何降低干燥过程中物料的营养物质损失、提升产品感官品质、加速物料的干燥过程已是干燥行业所面临的主要问题。超声处理、烫漂处理、渗透处理等多种果蔬干燥预处理技术已成为缩短干燥过程、提高干制品品质的主流方法，在食品果蔬干制加工中获得了越来越多的应用。

本章研究为探索最合理的哈密瓜片红外干燥预处理方式，选用三种最常见的预处理方式对哈密瓜片进行处理。超声处理能够改变物料内部和表面结构，加速水分迁移，缩短干燥时间，更多保留有效成分含量，使产品的品质更优[14]；蒸汽烫漂是传统的烫漂方式，它通过对果蔬进行加热，使之升温至一定程度，从而达到对果蔬的生物酶进行灭活、加快干燥速率等目的[7]；渗透处理可以去除果蔬组织中的部分水分，缩短干燥时间并降低能耗，在许多情况下，渗透处理还可以帮助改善产品的质感[13]。为评价产品优劣以及获得更好的感官品质以及加工品质，对哈密瓜片的干燥特性、色泽、维生素 C 含量、质构特性以及复水比进行了对比研究，最后通过变异系数法计算各预处理方式下干制品品质的综合评分，确定最佳预处理方式。同时计算了不同预处理的水分有效扩散系数并建立了相对应的干燥动力学模型，为干制品干燥特性研究以及后续的工艺优化提供理论支撑。

3.1 材料与方法

3.1.1 试验材料

哈密瓜，西州蜜 17 号，初始含水率为 90.81%±0.85%。选择大小适中、无病虫害、表皮完好的哈密瓜，清洗去皮、瓤、头尾，从内向外切成长 6 cm、宽 3 cm、厚 7 mm 的长方形薄片。每次试验取(200±2) g 哈密瓜片，试验目标干基含水率为 10%。在试验期间，每 15 min 称取重量一次，当含水率达到目标要求时结束干燥。各组试验均重复 3 次，结果取平均值进行分析。

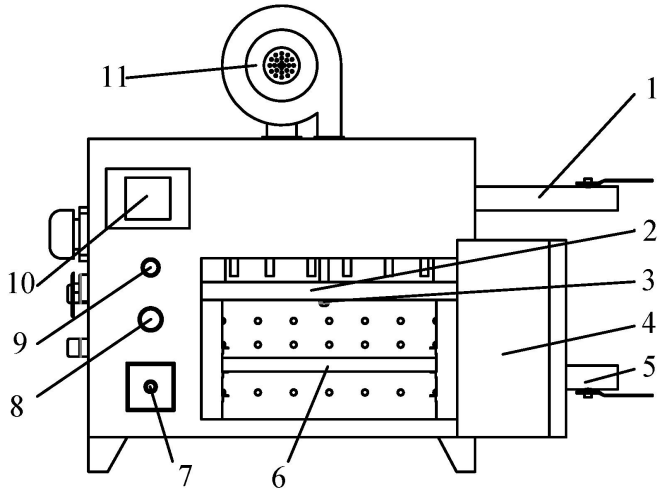
3.1.2 试验试剂

碳酸氢钠、草酸、高岭土、抗坏血酸、2,6-二氯酚靛酚钠、盐酸、甲基红、乙醇、

氢氧化钠、次甲基蓝、酒石酸钾钠、亚铁氰化钾、乙酸锌、冰乙酸、酚酞等试剂，均为国产分析纯试剂。

3.1.3 仪器设备

中短波红外干燥箱(圣泰科有限公司，功率 0~2 kW)，如图 3-1 所示；KQ2200DA 型超声波清洗机（昆山市超声仪器有限公司，功率 0~200 W，频率 40 kHz）；SMY-2000SF 型色差仪（北京盛名扬科技开发有限公司）；TA.XT plus 质构仪（英国 Stable Micro System 公司）；600 型电动抽（充）气自动包装机（郑州九博机械设备有限公司）；电子天平（上海卓精电子科技有限公司，精确度 0.0001 g）。



1.排湿口；2.红外管；3.温度传感器；4.门；5.排湿口；6.物料网盘；
7.调风旋钮；8.风机开关；9.加热开关；10.显示屏；11.风机
图 3-1 红外干燥机
Fig.3-1 Infrared dryer

3.1.4 试验方法

1.试验工艺流程：哈密瓜→拣选→冷藏（置于 4±1 ℃的冰柜，使水分分布均匀）→去皮、瓤→切片→预处理→红外干燥→封装→检测。

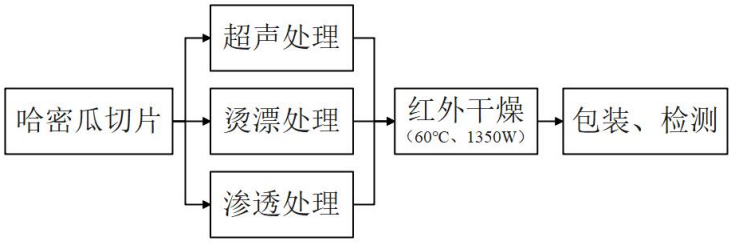


图 3-2 试验工艺流程图
Fig.3-2 The process flow path chant of experiments

2.预处理工艺

根据前期文献查阅研究与预试验结果，选用三种预处理工艺：超声处理、蒸汽烫

漂处理、葡萄糖渗透处理。未经预处理的哈密瓜片红外干制品作为对照组。

超声处理：室温环境下，将(200±2) g 哈密瓜切片置于以 25 ℃去离子水为介质的超声水浴中，在 200 W、40 kHz 的参数下进行超声处理 15 min。超声处理结束后，用厨房纸去除切片表面多余的水，备用[12,14]；

烫漂处理：将(200±2) g 哈密瓜切片置于热蒸汽锅中，烫漂温度和时间分别为 100 ℃和 2 min。达到烫漂时间后，将切片取出，放入 4±1 ℃的冷水中冷却至室温，用厨房纸去除切片表面多余的水，备用[7,13]；

渗透处理：室温环境下，将(200±2) g 哈密瓜切片浸没于浓度为 40%（m:m）的葡萄糖溶液中，料液比为 1:4，处理时间 120 min，渗透过程中每隔 15 min 搅拌一次，以避免葡萄糖溶液局部稀释。渗透处理结束后，立即取出哈密瓜切片，用去离子水冲洗切片表面，用厨房纸去除多余的水，备用[11]。

3.优选方法：同 2.1.3。

3.1.5 试验参数测定

1.含水率

干燥过程中哈密瓜片含水率计算公式如下[63]

$$W_t = \frac{m_t - m_d}{m_t} \times 100\% \quad (3-1)$$

$$w_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (3-2)$$

式中 W_t、w_t 分别为任意干燥 t 时刻的湿基含水率和干基含水率，%；m_t 为哈密瓜片任意干燥 t 时刻的质量，g；m_d 为哈密瓜片的绝干质量，g。

2.水分比

在干燥过程中，哈密瓜片中的水含量用水分比（MR, moisture ratio）来表示，计算公式如下[63]

$$MR = \frac{w_t - w_e}{w_0 - w_e} \quad (3-3)$$

式中 w_0，w_e 和 w_t 分别为哈密瓜片初始、平衡时和任意干燥 t 时刻的干基含水率，%。

因为哈密瓜片的平衡含水率 w_e 远小于 w_0 和 w_t，所以公式可简化为[63]

$$MR = \frac{w_t}{w_0} \quad (3-4)$$

3.色泽

选取干燥后的典型样品，利用 SMY-2000SF 型色差仪，依据 CIELAB 表色系统测量其色度 L^*、a^*、b^*值。不同干制处理组与鲜样的色泽差异值ΔE按下式计算，ΔE 值越小说明产品色泽越鲜亮，色泽品质越好[64,65]

$$\Delta E = \sqrt{（L^* - L_0^*）^2 + （a^* - a_0^*）^2 + （b^* - b_0^*）^2} \quad （3-5）$$

式中 L*、a*、b*为干制品明亮度、红绿值、蓝黄值；L*$_0$、a*$_0$、b*$_0$为鲜样明亮度、红绿值、蓝黄值。

4.维生素 C 含量

Vc 含量通过 2，6-二氯酚靛酚滴定法测定，结果以每 100 g 哈密瓜干制品中维生素 C 的毫克数（湿基）表示[66]。

5.质构特性

利用质构仪对干制处理后的哈密瓜片进行硬度、咀嚼性的测定，每组样品重复测定 5 次。探头：P0.5，全质构测定（texture profile analysis, TPA）模式，测定条件：测试速度 1 mm/s，测前速度 3 mm/s，测后速度 2 mm/s，测试距离 15 mm，压缩比 60%，触发力 1.5 N[12,37]。

6.复水比

复水比（Rehydration Ratio, RR）计算公式如下[59]

$$RR = \frac{m_r}{m_d} \quad （3-6）$$

式中 m_d为复水前样品的重量，g；m_r为复水后样品的重量，g。

7.水分有效扩散系数计算

不同样品的水分有效扩散系数可以用式（3-7）表示[67-69]：

$$MR = \frac{8}{\pi^2} - \exp（\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t）\quad （3-7）$$

式中 D_{eff}为干燥过程中哈密瓜片的水分有效扩散系数，m^2/s；L为哈密瓜片的半厚度，m；t为哈密瓜片的干燥时间，s。

两边取自然对数得到公式（3-8）。

$$ln\,MR = ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad （3-8）$$

8.干燥动力学数学模型建立

选取如下常用的 8 种经典干燥模型对哈密瓜的干燥曲线进行拟合，选取并建立最适合描述哈密瓜干燥过程的干燥动力学模型。

各模型拟合效果的优劣使用决定系数（correlationcoefficient，R^2）、卡方检验值（reducechi-square，χ^2）、均方根误差（rootmeansquareerror，$RMSE$）3 个参数来进行评判。R^2越接近于 1，χ^2和 $RMSE$ 越小，则表明模型的拟合效果越优，与哈密瓜片的干燥过程越吻合。

表 3-1 干燥模型及参数
Table 3-1 Drying models and their parameters

序号	名称	模型方程	参数	参考文献
1	Lewis	MR=exp(-Kt)	K	[70]
2	Page	MR=exp(-Kt^n)	K,n	[71]
3	Modified Page	MR=exp(-Kt)^n	K,n	[22]
4	Logarithmic	MR=a exp(-Kt)+c	K,a,c	[72]
5	Two-term	MR=a exp(-K_1t)+b exp(-K_2t)	K_1,K_2,a,b	[73]
6	Weibull	MR=exp(-(t/a)^b)	a,b	[74]
7	Henderson and Pabis	MR=a exp(-Kt)	K,a	[74]
8	Wang and Singh	MR=1+at+bt^2	a,b	[26]

3.1.6 统计分析

数据统计分析采用 SPSS 26.0 软件，均采用平均值，采用单因素方差分析（ANOVA）方法进行差异显著性分析，水平为 0.05。绘图采用 Origin 2021 软件。

3.2 结果与讨论

3.2.1 不同预处理对哈密瓜片红外干燥特性的影响

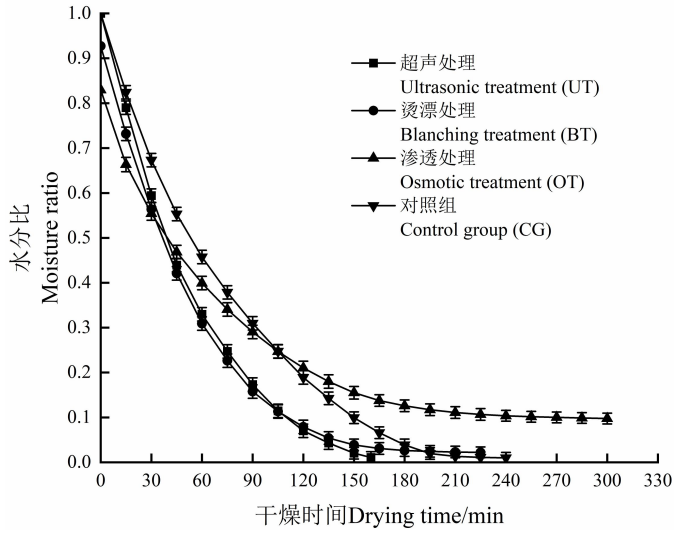


图 3-3 不同预处理的哈密瓜片的干燥曲线
Fig.3-3 Drying curves of Hami-melon slices with different pretreatments

不同预处理的哈密瓜片的干燥曲线如图 3-3 所示，各处理组哈密瓜片的干燥过程均属降速干燥。其中，超声处理组达到干燥终点用时最短，干燥时间 160 min 相较于对照组缩短了 33.3%。这是由于超声波的空化效应可引起哈密瓜片内部组织膨胀和收

缩，使其结构疏松多孔，形成细胞微通道，有利于内部水分的扩散与蒸发，加速干燥过程[34]。进行烫漂处理时，高温会破坏哈密瓜片内部组织，使其结构更加通透，水分更易蒸发，从而加快干燥速率。但烫漂处理组在干燥后期，干燥过程缓慢，导致干燥用时较长，为 225 min[13,44]。渗透处理会使哈密瓜片在干燥前脱去一部分水，但由于渗透过程中可溶性固形物的渗入，导致后续干燥过程中水分逸出困难，从而降低干燥速率，过程耗时 300 min，且干燥停止时，渗透处理组未能达到干燥终点要求的目标含水率[81]。马有川等[11]的研究也表明糖渗透处理会增大水分迁移扩散的阻力。

3.2.2 不同预处理对哈密瓜片色泽和维生素 C 含量的影响

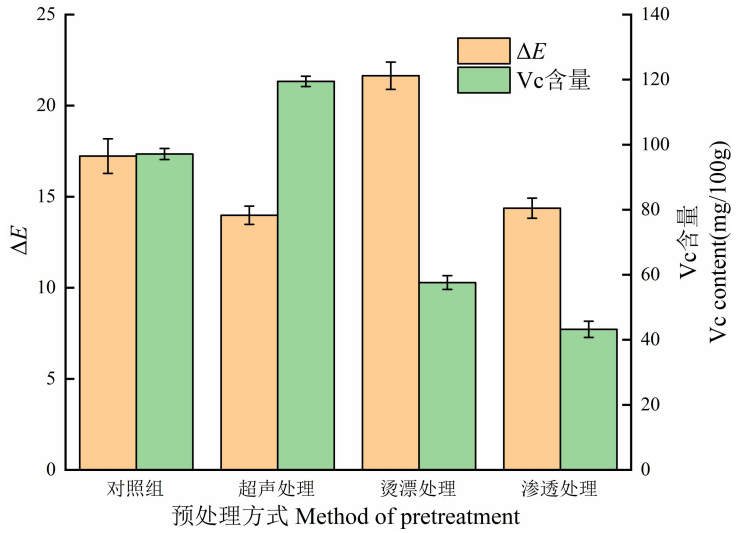
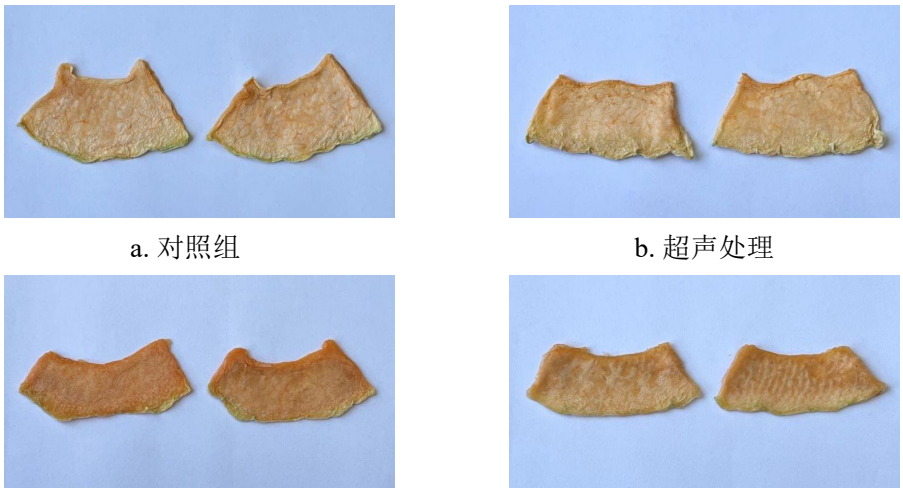


图 3-4 不同预处理对哈密瓜片色泽和 Vc 含量的影响

Fig.3-4 Effects of different pretreatments on the color and Vc content of Hami-melon slices



a. 对照组　　b. 超声处理

c. 烫漂处理　　d. 渗透处理

图 3-5 不同预处理方式的哈密瓜红外干制品

Fig.3-5 Different pretreatment methods of Hami-melon infrared dry products

不同处理组产品的色差值和 Vc 含量如图 3-4 所示。对照组的色差值和 Vc 含量分别为 17.23、97.13 mg/100 g。其中，超声处理组和渗透处理组的色差值小于对照组，

分别为 13.98、14.37。超声处理可有效缩短哈密瓜片的干燥时间，从而减少褐变降低产品的色差值。陈学玲等[82]的研究也表明经超声处理后的猕猴桃干制品亮度值增加，产品品质得到改善。渗透处理具有一定的护色作用，由于渗透过程可溶性固形物的不断渗入，增加了产品的亮度值，同时减少了干燥中褐变物质的产生[8,11]。烫漂处理组的色差值较对照组有所增大，为 21.64。这是由于高温破坏了物料表面的细胞，使内容物外流，不利于干燥过程中色泽的保持，另一方面可能是由于哈密瓜片在高温烫漂后，进行冷却时与空气接触，较大的温差加速了褐色物质的产生，导致切片表面出现色素沉积[44]。

烫漂处理组和渗透处理组的 Vc 含量远小于对照组，分别为 57.61 mg/100 g、43.21 mg/100 g。这是因为烫漂处理时，高温导致热敏性的 Vc 溶出、分解损失严重。进行渗透处理时，物料细胞内外长时间的物质交换使 Vc 渗出损失，同时较长时间的有氧加热干燥也导致了 Vc 含量降低[13,44]。有研究表明，超声波的空化效应可以促进生成羟基自由基，使 Vc 氧化降解，同时处理后的哈密瓜内部组织松散，造成 Vc 流出[14]。但超声处理组干燥时间短，有利于热敏性 Vc 的保留，最终使得产品的 Vc 含量高于对照组，为 119.46 mg/100 g。

3.2.3 不同预处理对哈密瓜片质构特性的影响

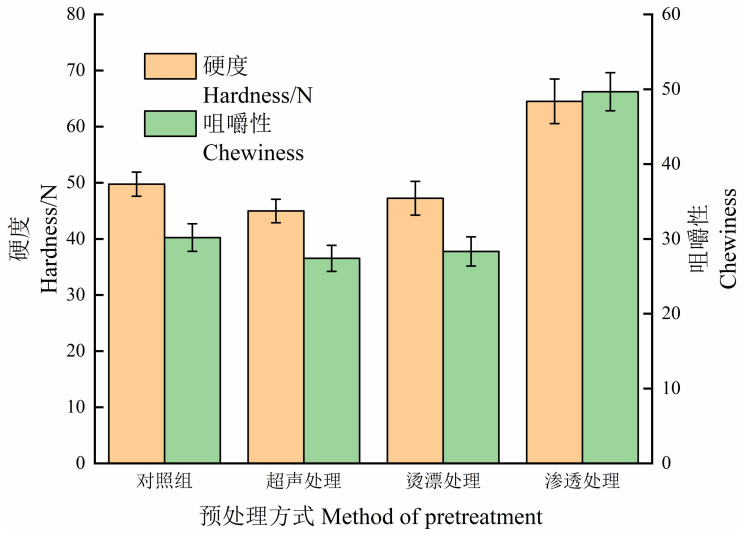


图 3-6 不同预处理对哈密瓜片质构特性的影响

Fig.3-6 Effects of different pretreatments on the texture of Hami-melon slices

不同预处理组产品的硬度、咀嚼性如图 3-5 所示。超声处理组和烫漂处理组相较于对照组，产品硬度降低，分别为 44.97 N、47.25 N，咀嚼性较好，分别为 27.41、28.32。超声处理和烫漂处理通过改变哈密瓜片内部的细胞组织结构，进而改变其干燥过程。干燥进行时，预处理造成哈密瓜片的内部结构塌陷使得细胞内水分迅速蒸发，同时随着毛细孔道尺寸增大，造成哈密瓜片内部结构进一步塌陷，产生“海绵效应”，

质地变软，咀嚼性较好[83]。苑丽婧等[14]在 HAD 干制猕猴桃、周峭等[38]在 FD 干制苹果切片的研究中均报道了，经超声处理后干制品的硬度较对照组显著降低。徐汝祯[13]在猕猴桃射频真空-热风干燥过程中也发现，烫漂处理可降低猕猴桃干制产品的硬度。渗透处理组产品的硬度较对照组有较大提高，为 64.52 N，咀嚼性较差，为 49.67。原因是渗透处理物料脱水过程中伴随着其内外物质的传递，随着渗透液中可溶性固形物的渗入，导致哈密瓜片内部组织结构间充满了葡萄糖，从而使哈密瓜片组织结构间的联系更加紧密，因此产品硬度值增大。同时随着干燥过程的进行，水分的不断流失，糖液发生结晶析出并吸附在哈密瓜片组织内部或者迁移到表面形成硬壳，导致产品有较高的硬度值[11,81]。以上结果表明，超声处理和烫漂处理可作为预处理改善哈密瓜红外干制品的质构特性。

3.2.4 不同预处理对哈密瓜片复水比的影响

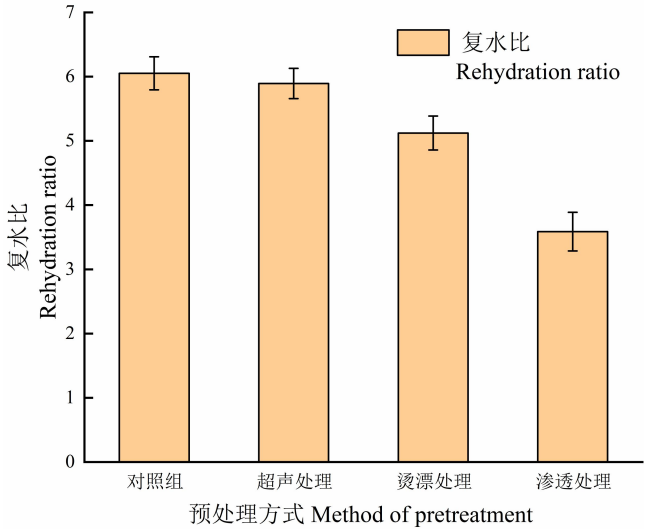


图 3-7 不同预处理对哈密瓜片复水比的影响

Fig.3-7 Effects of different pretreatments on the rehydration ratio of Hami-melon slices

不同预处理下哈密瓜片的复水比如图 3-6 所示。干制品的复水性受到细胞和组织孔隙率的影响，预处理和较长时间干燥会导致组织细胞受损，细胞膜通透性降低[13,44]。超声处理、烫漂处理和渗透处理组产品的复水比分别为 5.89、5.12、3.59。超声处理对哈密瓜片复水比的影响较小，超声处理虽然会在一定程度上破坏其内部组织与细胞结构，但获得了较短的干燥时间，保证了产品较好的复水比。烫漂处理的高温破坏了哈密瓜片的组织结构，细胞壁、细胞膜破裂，产品的复水能力较差[44]。渗透处理组产品相较于对照组，复水比最低，复水能力最差。这是因为渗透处理的哈密瓜细胞间隙存在葡萄糖，减少了孔隙率，加之干燥时间长，因此其产品的复水比最低[81]。在研究蔗糖渗透处理苹果、猕猴桃的复水行为时，研究人员也观察到类似现象[11,13]。

3.2.5 不同预处理下的水分有效扩散系数与干燥数学模型研究

水分有效扩散系数反映了不同干燥过程中样品的干燥速率大小，同时也是工艺优化时的重要参考[25]。不同预处理下红外干燥的 lnMR 线性拟合方程和水分有效扩散系数如表 3-1 所示。各拟合方程的决定系数R^2在 0.91981~0.97396 之间，表明拟合效果较好。超声处理组的 D_{eff}为 2.22×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$，大于对照组，表明超声处理可加快红外干燥速率，缩短干燥过程。烫漂处理组、渗透处理组的 D_{eff}分别为 1.54×10^{-9}、6.26×10^{-10} $m^2\cdot s^{-1}$。

表 3-2 不同预处理下的水分有效扩散系数

Table 3-2 The effective diffusion coefficient of water under different pretreatment

预处理方式	线性回归拟合方程	决定系数 R^2	水分有效扩散系数 D_{eff}/($m^2\cdot s^{-1}$)
对照组	lnMR=-3.41×10^{-4}t-0.41499	0.96262	1.69×10^{-9}
超声处理	lnMR=-4.46×10^{-4}t+0.3442	0.96227	2.22×10^{-9}
烫漂处理	lnMR=-3.09×10^{-4}t-0.14269	0.97396	1.54×10^{-9}
渗透处理	lnMR=-1.26×10^{-4}t-0.51818	0.91981	6.26×10^{-10}

不同预处理下红外干燥的数学模型拟合结果如表 3-2 所示。超声处理组水分比随时间变化的干燥曲线与各数学模型的非线性拟合结果显示，Page、Weibull 模型的R^2均高于 0.998，均可以被用来描述哈密瓜片超声处理后 IRD 的脱水规律；烫漂处理组水分比随时间变化的干燥曲线与各数学模型的非线性拟合结果显示，Two-term 模型的R^2最高为 0.99859，最适合被用来模拟哈密瓜片烫漂处理后 IRD 的干燥过程；渗透处理组水分比随时间变化的干燥曲线与各数学模型的非线性拟合结果显示，Two-term 和 Logarithmic 模型的R^2分别为 0.99903 和 0.99866，均可以用来对哈密瓜片渗透处理后 IRD 干燥过程的水分比变化情况进行描述，模拟干燥过程。

表 3-3 不同预处理的干燥数学模型拟合结果

Table 3-3 Drying mathematical model fitting results of different pretreatments

模型	预处理	模型常数	R^2	*RMSE*	χ^2
Lewis	UT	K=0.01912	0.99311	0.02704	7.311×10^{-4}
	BT	K=0.01997	0.99446	0.02114	4.468×10^{-4}
	OT	K=0.01371	0.87434	0.07481	5.6×10^{-3}
Page	UT	K=0.00981,n=1.16066	0.99866	0.0119	1.416×10^{-4}
	BT	K=0.01769,n=1.02915	0.99429	0.02147	4.611×10^{-4}
	OT	K=0.06739,n=0.64771	0.95955	0.04245	1.8×10^{-3}
Modified Page	UT	K=0.01623,n=1.17775	0.99242	0.02836	8.042×10^{-4}
	BT	K=0.01723,n=1.15887	0.99407	0.02188	4.787×10^{-4}
	OT	K=0.01182,n=1.1595	0.86773	0.07675	5.89×10^{-3}

Logarithmic	UT	K=1.36467,a=0.74249 c=0.2575	0.30728	0.27104	0.07346
	BT	K=1.67622,a=0.73913 c=0.1881	0.33437	0.23176	0.05371
	OT	K=0.01448,a=0.74231 c=0.07975	0.99866	0.00771	5.946×10^{-5}
Two-term	UT	K_1=117.2984,K_2=0.02099 a=-0.10337,b=1.10336	0.99601	0.02056	4.229×10^{-4}
	BT	K_1=67.24944,K_2=0.02015 a=-0.08261,b=1.00983	0.99859	0.01066	1.136×10^{-4}
	OT	K_1=0.01309,K_2=-0.0035 a=0.78731,b=0.02927	0.99903	0.00657	4.316×10^{-5}
Weibull	UT	a=53.76531,b=1.16066	0.99866	0.0119	1.416×10^{-4}
	BT	a=50.41242,b=1.02915	0.99429	0.02147	4.611×10^{-4}
	OT	a=64.35252,b=0.64771	0.95955	0.04245	1.8×10^{-3}
Henderson and Pabis	UT	K=0.01968,a=1.03145	0.9938	0.02565	6.578×10^{-4}
	BT	K=0.01908,a=0.95333	0.99691	0.01578	2.491×10^{-4}
	OT	K=0.01018,a=0.77507	0.97619	0.03257	1.06×10^{-3}
Wang and Singh	UT	a=-0.0138,b=4.8795×10^{-5}	0.99417	0.02486	6.18×10^{-4}
	BT	a=-0.01262,b=3.85978×10^{-5}	0.94565	0.06623	4.39×10^{-3}
	OT	a=-0.00924,b=2.21064×10^{-5}	0.75319	0.10484	0.01099

3.2.6 不同预处理下哈密瓜干制品的综合评分

采用变异系数法确定各指标的平均值、标准差、变异系数及权重，结果见表 3-4。

表 3-4 不同预处理方式下各指标的权重

Table 3-4 Weight of each index under different pretreatment methods

指标	平均值	标准差	变异系数	权重 (%)
干燥时间	230	57.735	0.251	15.643
色差值	16.805	3.534	0.21	13.105
Vc 含量	79.352	35.136	0.443	27.593
硬度	51.628	8.814	0.171	10.639
咀嚼性	33.895	10.58	0.312	19.451
复水比	5.162	1.124	0.218	13.57

由表 3-5 可知，Vc 含量、咀嚼性和干燥时间所占权重较大，表明哈密瓜干制品

的 Vc 含量、咀嚼性和干燥时间受不同预处理方式的影响相对较大。根据不同哈密瓜干制品的各指标值及其权重，计算综合评分。各指标的标准化值及不同预处理方式的综合评分如表 3-5 所示。由表 3-5 可知，不同预处理方式中超声处理的综合评分最高，因此，本试验研究中，经超声处理的哈密瓜干制品品质最好。

表 3-5 各指标的标准化值及综合评分

Table 3-5 Comprehensive score of dried seabuckthorn under different pretreatment methods

预处理方式	干燥时间	色差值	Vc 含量	硬度	咀嚼性	复水比	综合评分	排名
对照组	0.2	0.139	0.584	-0.245	-0.405	0.912	0.341	2
超声处理	-1.4	-0.923	1.318	-0.871	-0.708	0.747	1.036	1
烫漂处理	-0.2	1.579	-0.715	-0.573	-0.608	-0.044	-0.2	3
渗透处理	1.4	-0.796	-1.188	1.689	1.722	-1.615	-1.177	4

3.3 本章小结

本章以研究预处理技术为主，通过对比不同预处理方式（超声处理、烫漂处理、渗透处理）对哈密瓜红外干燥特性及品质（色泽、Vc 含量、质构、复水比）的影响，综合比较了各预处理方式的优劣，确定了最适合的哈密瓜红外干燥预处理方式，同时研究计算了不同预处理的红外干燥水分有效扩散系数并建立了相应的干燥动力学模型，具体结论如下：

1）在相同的红外干燥条件下，各组间干燥耗时差异较大，各干燥过程均为降速干燥。超声处理后的哈密瓜片内部组织结构松散，干燥过程中水分更易迁移逸出，因此耗时最短为 160 min，水分有效扩散系数最大为 2.22×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$。烫漂处理组和渗透处理组干燥耗时较长，分别为 225 min、300 min，水分有效扩散系数小分别为 1.54×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$、6.26×10^{-10} $m^2\cdot s^{-1}$，且渗透处理组产品未能达到目标含水率。干燥模型拟合结果表明，Page、Weibull 模型适用于描述哈密瓜片超声处理后 IRD 的脱水规律，Two-term 模型最适合被用来模拟哈密瓜片烫漂处理后 IRD 的干燥过程，Logarithmic 和 Two-term 模型能更好的描述哈密瓜片渗透处理后 IRD 干燥过程的水分比变化情况；

2）对各组干制品的色泽、维生素 C 含量、质构、复水性进行了对比分析，超声处理组产品的各品质指标较优，但由于超声处理对其内部结构的改变，复水性相较于对照组略低，烫漂处理组产品品质居中，渗透处理组产品的综合品质最差。

综上所述，对各组的干燥耗时、产品品质综合对比分析，得出超声处理组产品的综合评分最高，因此确定超声处理为哈密瓜片红外干燥的预处理方式。

第 4 章 超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺优化

干燥工艺参数是决定产品品质优劣的关键因素，物料不同，对应的最佳工艺参数则不同，本章研究将超声处理作为哈密瓜片红外干燥的预处理方式，旨在优化哈密瓜超声处理红外干燥工艺，获得最佳品质的哈密瓜干制品[29,61]。

超声处理时间是干燥过程中重要的工艺参数，适当时间的超声处理可以加快干燥过程中内部水分的扩散与蒸发，缩短干燥时间，提升品质，超声处理时间过长则会破坏物料本身的组织结构及含有的营养成分[14,44]。干燥温度和切片厚度也会影响物料的干燥时间、品质和营养物质的保留[56]。由此选定超声处理时间、干燥温度、切片厚度 3 个影响因素，以干燥时间、色差值和热敏性的 Vc 含量为评价指标，采用单因素试验法确定影响因素的水平，在单因素试验基础上，运用响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计试验优化工艺参数[6]。研究干燥温度、切片厚度、超声处理时间和三者交互作用对干燥时间、色差值、Vc 含量的影响，建立回归模型，得到较优工艺参数并试验验证，并对其干制品与未经超声处理的干制品的干燥特性、品质和微观结构等进行对比研究，以期获得最佳品质的产品。

4.1 材料与方法

4.1.1 试验材料

哈密瓜，西州蜜 17 号，初始含水率为 90.81%±0.85%。选择大小适中、无病虫害、表皮完好的哈密瓜，清洗去皮、瓤、头尾，从内向外切成长 6 cm、宽 3 cm 厚度均匀的长方形薄片。每次试验取(200±2) g 哈密瓜片，试验目标干基含水率为 10%。在试验期间，每 15 min 称取重量一次，当含水率达到目标要求时结束干燥。各组试验均重复 3 次，结果取平均值进行分析。

4.1.2 试验试剂

碳酸氢钠、草酸、高岭土、抗坏血酸、2,6-二氯酚靛酚钠、盐酸、甲基红、乙醇、氢氧化钠、次甲基蓝、酒石酸钾钠、亚铁氰化钾、乙酸锌、冰乙酸、酚酞等试剂，均为国产分析纯试剂。

4.1.3 仪器设备

中短波红外干燥箱(圣泰科有限公司，功率 0~2 kW)；KQ2200DA 型超声波清洗机（昆山市超声仪器有限公司，功率 0~200 W，频率 40 kHz）；SMY-2000SF 型色差仪（北京盛名扬科技开发有限公司）；SU8010 场发射扫描电子显微镜（日立 Hitachi 公司）；600 型电动抽（充）气自动包装机（郑州九博机械设备有限公司）；电子天平（上海卓精电子科技有限公司，精确度 0.0001 g）。

4.1.4 试验方法

1.试验工艺流程

工艺流程：哈密瓜→拣选→冷藏（置于 4±1 ℃的冰柜，使水分分布均匀）→去皮、瓤→切片→超声处理→红外干燥→封装→检测。

超声处理：室温环境下，将(200±2) g 哈密瓜切片置于以 25 ℃的去离子水为介质的超声水浴中，在 200 W、40 kHz 的参数下进行超声处理。超声处理结束后，用厨房纸去除切片表面多余的水，备用。

2.单因素试验设计

超声处理时间是干燥过程中重要的工艺参数，适当时间的超声处理可以加快干燥过程中内部水分的扩散与蒸发，缩短干燥时间，提升品质，超声处理时间过长则会破坏物料本身的组织结构及含有的营养成分[14,44]。其次，干燥温度和切片厚度也会影响物料的干燥时间、品质和营养物质的保留[56]。由此选取干燥温度、切片厚度、超声处理时间 3 个影响因素，以干燥时间、色差值和 Vc 含量为评价指标，采用单因素试验法确定影响因素的水平，分析各因素对评价指标的影响。试验方案见表 4-1。

表 4-1 单因素试验方案

Table 4-1 Single factor test scheme

分组	试验编号	试验条件	干燥参数	
第一组	1	切片厚度：7 mm 超声处理时间：15 min	干燥温度/℃	50
	2			55
	3			60
	4			65
	5			70
第二组	6	干燥温度：60 ℃ 超声处理时间：15 min	切片厚度/mm	4
	7			7
	8			10
第三组	9	干燥温度：60 ℃ 切片厚度：7 mm	超声处理时间/min	5
	10			10
	11			15
	12			20
	13			25

3.响应面优化设计

在单因素试验基础上，分析试验数据结果，运用 Box-Behnken 中心组合设计原理，以干燥温度(X_1)、切片厚度(X_2)、超声处理时间(X_3)为自变量，研究其与干燥时间(Y_1)、色差值(Y_2)、Vc 含量(Y_3)的关系[84]。通过对单因素试验进行分析，得出各试验因素的水平，见表 4-2。

表 4-2 试验因素水平表

Table 4-2 Factors and levels of the test

因素	水平		
	-1	0	1
干燥温度 X_1/℃	55	60	65
切片厚度 X_2/mm	4	7	10
超声处理时间 X_3/min	10	15	20

4.1.5 试验参数测定

1.含水率

干燥过程中哈密瓜片含水率计算公式如下[63]

$$W_t = \frac{m_t - m_d}{m_t} \times 100\% \quad (4-1)$$

$$w_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (4-2)$$

式中 W_t、w_t 分别为任意干燥 t 时刻的湿基含水率和干基含水率，%；m_t 为哈密瓜片任意干燥 t 时刻的质量，g；m_d 为哈密瓜片的绝干质量，g。

2.水分比

在干燥过程中，哈密瓜片中的水含量用水分比（MR, moisture ratio）来表示，计算公式如下[63]

$$MR = \frac{w_t - w_e}{w_0 - w_e} \quad (4-3)$$

式中 w_0，w_e 和 w_t 分别为哈密瓜片初始、平衡时和任意干燥 t 时刻的干基含水率，%。

因为哈密瓜片的平衡含水率 w_e 远小于 w_0 和 w_t，所以公式可简化为[63]

$$MR = \frac{w_t}{w_0} \quad (4-4)$$

3.色泽

选取干燥后的典型样品，利用 SMY-2000SF 型色差仪，依据 CIELAB 表色系统测量其色度 L^*、a^*、b^*值。不同干制处理组与鲜样的色泽差异值ΔE按下式计算，ΔE 值越小说明产品色泽越鲜亮，色泽品质越好[64,65]

$$\Delta E=\sqrt{（L^{*}-L_{0}^{*}）^{2}+（a^{*}-a_{0}^{*}）^{2}+（b^{*}-b_{0}^{*}）^{2}} \qquad （4-5）$$

式中 L^{*}、a^{*}、b^{*}为干制品明亮度、红绿值、蓝黄值；L^{*}_{0}、a^{*}_{0}、b^{*}_{0}为鲜样明亮度、红绿值、蓝黄值。

4.维生素 C 含量

Vc 含量通过 2，6-二氯酚靛酚滴定法测定，结果以每 100 g 哈密瓜干制品中维生素 C 的毫克数（湿基）表示[66]。

5.微观结构

选取干燥后典型样品，用液氮速冻处理后立即掰断，自然形成脆片横断面，作为观察样本，用碳导电胶将样本粘在样品托上，喷金，进行电子显微镜扫描，重复观察不同区域的组织结构并分析[66]。

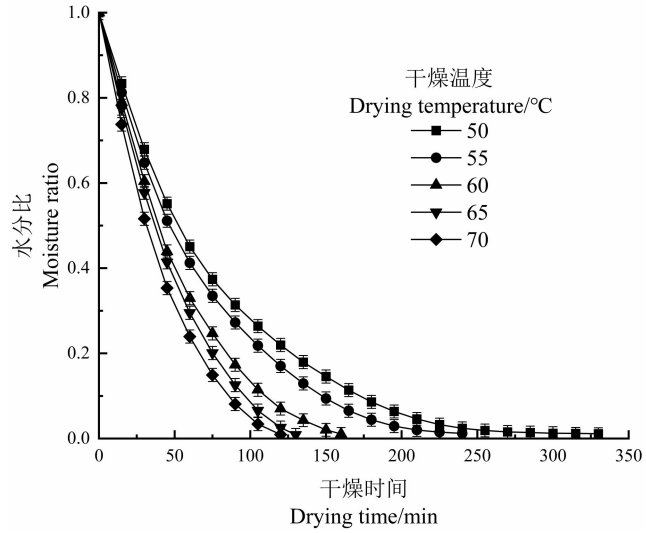
4.1.6 统计分析

数据统计分析采用 SPSS 26.0 软件，均采用平均值，采用单因素方差分析（ANOVA）方法进行差异显著性分析，水平为 0.05。响应面分析采用 Design-Expert 12 软件。绘图采用 Origin 2021 软件。

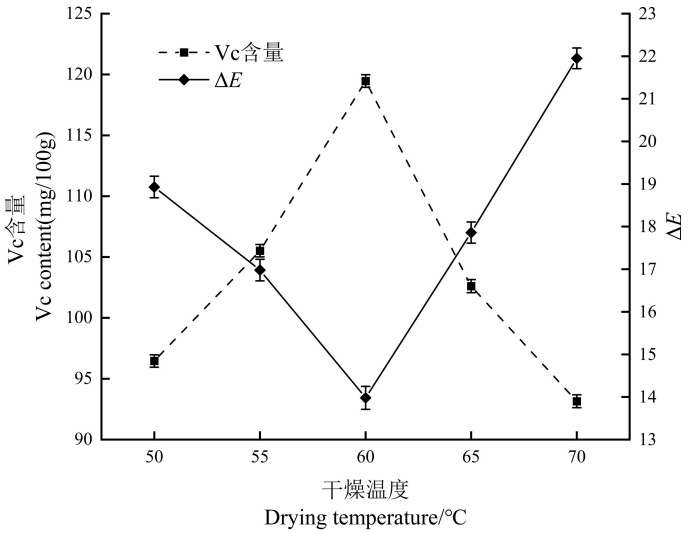
4.2 结果与讨论

4.2.1 干燥温度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

切片厚度为 7 mm、超声处理时间为 15 min 时，不同干燥温度下的哈密瓜片干燥曲线、色差值和 Vc 含量变化如图 4-1 所示。干燥时间随干燥温度的升高而减少。干燥温度为 70 ℃比 50 ℃时干燥时间缩短了 63.64%。由于干燥温度升高，物料表面温度也随之迅速升高，传热传质动力增强，加速了物料内水分的迁移、扩散与蒸发[85]。哈密瓜片在有氧环境下进行加热干燥时，会导致热敏性的 Vc 损失，同时会产生酶促、非酶促反应，导致褐变[78]。不同产品的色差值在 13.98～21.95 之间，Vc 含量在 93.15～119.46 mg/100 g 之间。当温度在 50～60℃时，随温度的升高色差值逐渐减小、Vc 含量逐渐增加。干燥时间越短，色泽保持越好，Vc 保留率越高[56]。当温度高于 60 ℃时，随温度升高色差值逐渐增大、Vc 含量逐渐减少。干燥温度过高或长时间低温干燥，均会导致物料的色差增大、Vc 损失严重[86]。当温度为 60 ℃时，色差值较小为 13.98，Vc 含量较高为 119.46 mg/100 g。



a. 不同干燥温度下哈密瓜片的干燥曲线



b. 不同干燥温度下哈密瓜片的 Vc 含量和色差值

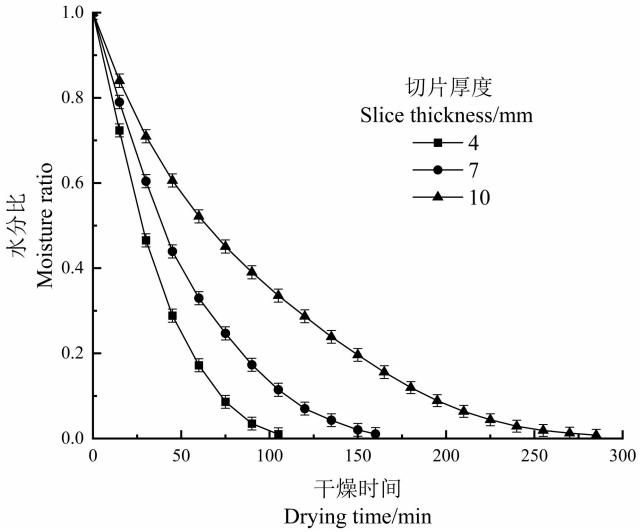
图 4-1 干燥温度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

Fig.4-1 Effects of drying temperature on drying characteristics and quality of Hami-melon slices

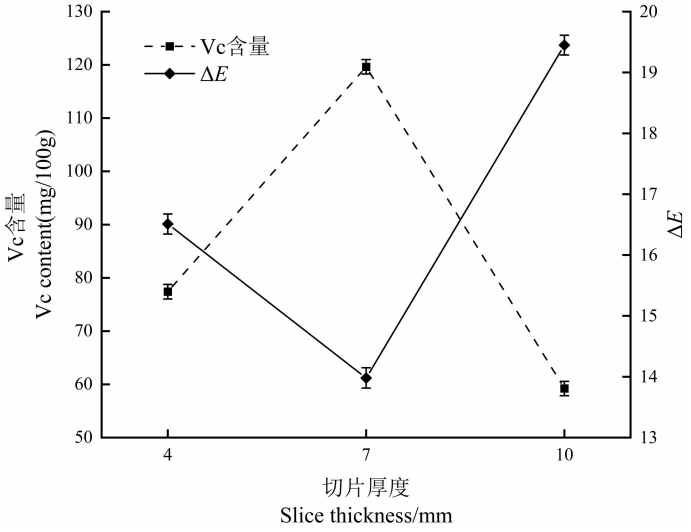
4.2.2 切片厚度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

干燥温度为 60 ℃、超声处理时间为 15 min 时，不同切片厚度下的哈密瓜片干燥曲线、色差值和 Vc 含量变化如图 4-2 所示。干燥时间受切片厚度的影响较大，切片厚度越大，干燥时间越长。当切片厚度增加时，物料内水分向表面扩散的阻力也随之增加，从而延长了干燥时间[87]。不同产品的色差值在 13.98～19.45 之间。切片厚度较薄时，预处理可能导致哈密瓜中色素物质损失，不利于干燥过程中色泽的保持[14]。切片厚度较厚时，干燥时间延长，使哈密瓜片褐变严重，色差增大。当切片厚度为 7mm 时，色差值较小为 13.98。Vc 含量随切片厚度的增大先增加后减少。切片厚度较薄为 4 mm 时，干燥时间虽短，但会造成 Vc 损失较多，含量较少为

77.41mg/100g[87]。之后随片厚的增大 Vc 含量呈增加的趋势，当切片厚度为 7 mm 时，Vc 含量较高为 119.46 mg/100 g。当片厚超过 7 mm 时，干燥时间延长，影响了 Vc 的保留，切片厚度为 10 mm 时，Vc 含量最少为 59.22 mg/100g。



a. 不同切片厚度下哈密瓜片的干燥曲线



b. 不同切片厚度下哈密瓜片的 Vc 含量和色差值

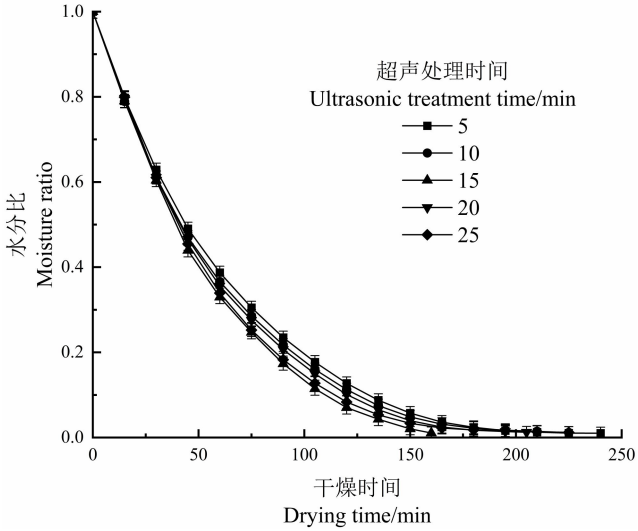
图 4-2 切片厚度对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

Fig.4-2 Effect of slice thickness on drying characteristics and quality of Hami-melon slices

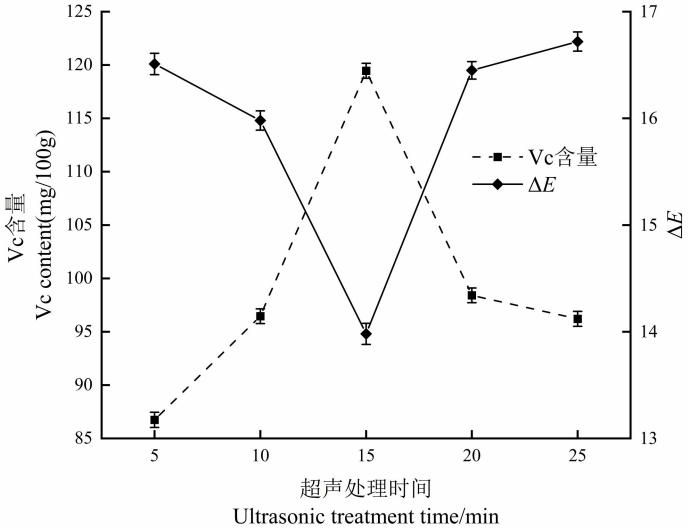
4.2.3 超声处理时间对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

干燥温度为 60 ℃、切片厚度为 7 mm 时，不同超声处理时间下的哈密瓜片干燥曲线、色差值和 Vc 含量变化如图 4-3 所示。超声波的空化效应可引起哈密瓜片内部组织膨胀和收缩，形成细胞微通道，使其结构疏松多孔，有利于内部水分的扩散与蒸发[34]。超声处理时间过长则会破坏哈密瓜片本身的组织结构及含有的营养成分，适当时间的超声处理可以加快干燥过程中内部水分的扩散与蒸发，加速干燥过程，提升

产品品质[44]。当超声处理时间为 15 min 时，干燥时间为 160 min，色差值较小为 13.98，Vc 含量较高为 119.46 mg/100 g。



a. 不同超声处理时间下哈密瓜片的干燥曲线



b. 不同超声处理时间下哈密瓜片的 Vc 含量和色差值

图 4-3 超声处理时间对哈密瓜片干燥特性和品质的影响

Fig.4-3 Effect of ultrasonic treatment time on drying characteristics and quality of Hami-melon slices

4.2.4 响应面优化设计与试验

1. 试验结果方差与回归分析

为分析干燥温度（X_1）、切片厚度（X_2）和超声处理时间（X_3）对干燥时间（Y_1）、色差值（Y_2）和 Vc 含量（Y_3）的影响，采用响应面法分析并进行设计优化，试验结果见表 4-3。

表 4-3 响应面试验设计与结果

Table 4-3 Design and results of response surface test

序号	干燥温度 X_1/℃	切片厚度 X_2/mm	超声处理时间 X_3/min	干燥时间 Y_1/min	色差值 Y_2	Vc 含量 Y_3(mg/100g)
1	55（-1）	4（-1）	15（0）	134	19.53	58.85
2	65（1）	4（-1）	15（0）	65	20.46	56.65
3	55（-1）	10（1）	15（0）	356	22.57	43.51
4	65（1）	10（1）	15（0）	270	23.43	40.59
5	55（-1）	7（0）	10（-1）	284	19.25	75.12
6	65（1）	7（0）	10（-1）	205	20.23	73.14
7	55（-1）	7（0）	20（1）	270	19.86	77.16
8	65（1）	7（0）	20（1）	187	20.63	74.35
9	60（0）	4（-1）	10（-1）	137	17.98	55.87
10	60（0）	10（1）	10（-1）	360	21.03	40.75
11	60（0）	4（-1）	20（1）	127	18.15	59.21
12	60（0）	10（1）	20（1）	332	21.09	42.88
13	60（0）	7（0）	15（0）	161	14.01	119.49
14	60（0）	7（0）	15（0）	160	13.84	118.97
15	60（0）	7（0）	15（0）	160	13.98	119.46
16	60（0）	7（0）	15（0）	164	13.97	119.45
17	60（0）	7（0）	15（0）	159	13.82	119.44

表 4-4 回归系数的显著性检验

Table 4-4 Significance test of regression coefficient

干燥时间 Y_1			色差值 Y_2			Vc 含量 Y_3		
项目	*F* 值	*P* 值	项目	*F* 值	*P* 值	项目	*F* 值	*P* 值
X_1	3 441.4	<0.000 1	X_1	102.65	<0.000 1	X_1	104.36	<0.000 1
X_2	25 035.1	<0.000 1	X_2	1 179.55	<0.000 1	X_2	4 197.38	<0.000 1
X_3	167.81	<0.000 1	X_3	12.6	0.009 4	X_3	80.8	<0.000 1
X_1X_2	19.79	0.003	X_1X_2	0.08	0.785 1	X_1X_2	1.1	0.328 8
X_1X_3	1.1	0.33	X_1X_3	0.72	0.423 4	X_1X_3	1.46	0.265 6
X_2X_3	22.19	0.002 2	X_2X_3	0.2	0.669 6	X_2X_3	3.11	0.121 1
X_1^2	532	<0.000 1	X_1^2	4 418.57	<0.000 1	X_1^2	17 479.14	<0.000 1
X_2^2	663.07	<0.000 1	X_2^2	3 520.01	<0.000 1	X_2^2	80 293.82	<0.000 1
X_3^2	3391.9	<0.000 1	X_3^2	1 178.58	<0.000 1	X_3^2	17 832.89	<0.000 1

利用 Design-Expert 软件对表 4-3 进行多元回归分析，建立回归数学模型，对其

回归系数进行显著性检验，结果如表 4-4 所示。保留上述模型显著项，剔除不显著项，最终得出超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺的回归方程为：

$$Y_1=160.8-39.63X_1+106.88X_2-8.75X_3-4.25X_1X_2-4.5X_2X_3+21.47X_1^2+23.97X_2^2+54.23X_3^2, \quad (4\text{-}6)$$

$$Y_2=13.92+0.44X_1+1.5X_2+0.15X_3+4X_1^2+3.57X_2^2+2.07X_3^2, \quad (4\text{-}7)$$

$$Y_3=119.36-1.24X_1-7.86X_2+1.09X_3-22.1X_1^2-47.36X_2^2-22.32X_3^2。 \quad (4\text{-}8)$$

表 4-5 回归模型方差分析

Table 4-5 Regression model analysis of variance

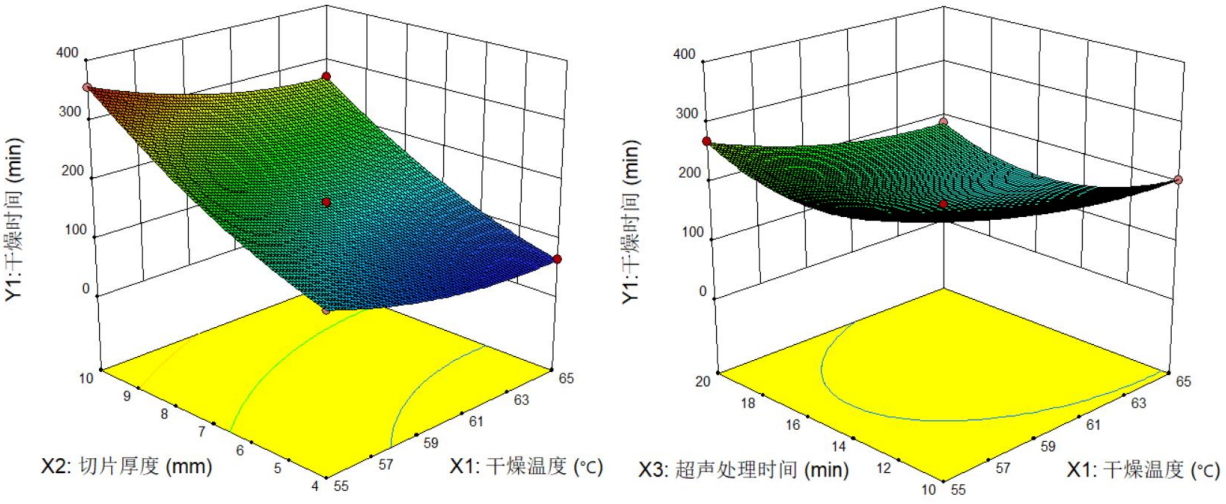
指标	*F* 值	*P* 值	失拟项		校正决定系数 R^2
			F_{Lf}值	P_{Lf}值	
干燥时间 Y_1	3 742.83	<0.000 1	0.97	0.49	0.999 8
色差值 Y_2	1 265.56	<0.000 1	3.33	0.138	0.999 4
维生素 C 含量 Y_3	14 562.62	<0.000 1	4.34	0.095	0.999 9

由表 4-5 可知，干燥时间回归方程的显著性 F 值为 3742.83，对应的 P 值<0.000 1，这说明该模型是极显著的；失拟项 F_{Lf}为 0.97，对应的 P_{Lf}值为 0.49（P_{Lf}>0.05），代表失拟项不显著，说明试验误差小；干燥时间回归方程 R^2 为 0.999 8，代表拟合度达到 99.98%，能较好地预测干燥时间；色差值、Vc 含量回归方程的 R^2 均高达 0.999 以上，均能较好的预测色差值和 Vc 含量[84]。此外，通过回归方程得出 3 个试验因素对干燥时间的影响程度从大到小为切片厚度（X_2）、干燥温度（X_1）、超声处理时间（X_3）且 $X_3^2>X_2^2>X_1^2$；对色差值的影响程度从大到小为切片厚度（X_2）、干燥温度（X_1）、超声处理时间（X_3）且 $X_1^2>X_2^2>X_3^2$；对 Vc 含量的影响程度从大到小为切片厚度（X_2）、干燥温度（X_1）、超声处理时间（X_3）且 $X_2^2>X_3^2>X_1^2$。

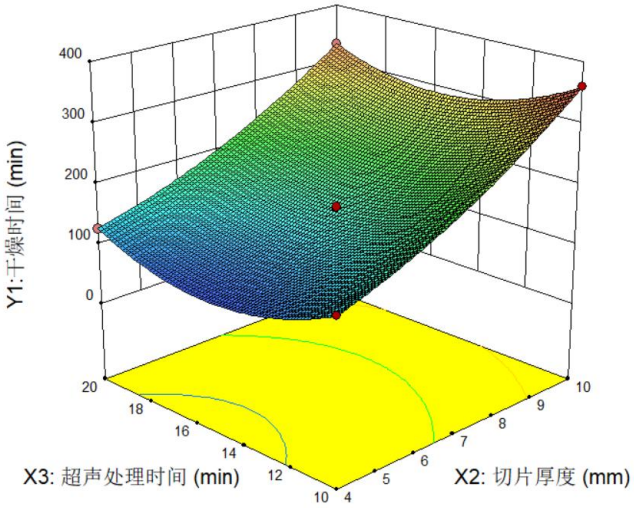
2. 因素交互作用响应面分析

通过 Design-Expert 软件分析获得了各影响因素交互作用的三维响应曲面图。响应面图可以直观反映出各影响因素对响应值的影响程度，曲面倾斜度越大，表明该因素对响应值的影响越大，响应面的等高线可反映两因素交互作用的强弱，等高线中椭圆的离心率越大，响应面中图形的曲线越陡，说明其交互作用影响越显著[18]。

各因素交互作用对干燥时间的影响如图 4-4 所示，由图可知干燥温度（X_1）与切片厚度（X_2）的交互作用以及切片厚度（X_2）与超声处理时间（X_3）的交互作用对干燥时间的影响较大（P<0.05）。随着干燥温度的增大与切片厚度的减小，干燥时间缩短，且当切片厚度较小时，干燥温度对干燥时间的影响减弱；当切片厚度固定时，干燥时间随超声处理时间的增大先减小后增加。干燥温度（X_1）与超声处理时间（X_3）的交互作用对干燥时间的影响不明显，两因素交互作用对干燥时间的影响顺序为：$X_2X_3>X_1X_2$，这与方差分析结果一致。



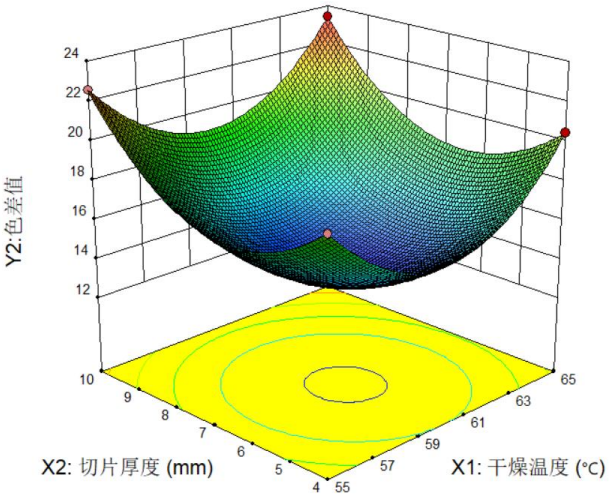
a. 干燥温度和切片厚度对干燥时间的响应面图　b. 干燥温度和超声处理时间对干燥时间的响应面图



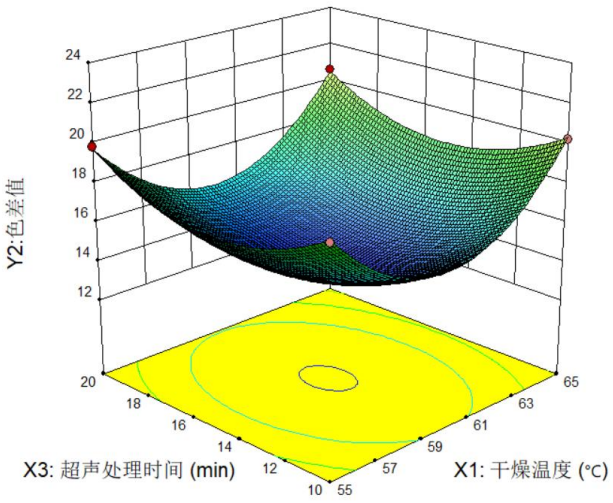
c. 切片厚度和超声处理时间对干燥时间的响应面图

图 4-4 因素交互作用对干燥时间的影响
Fig.4-4 Influence of factor interaction on drying time

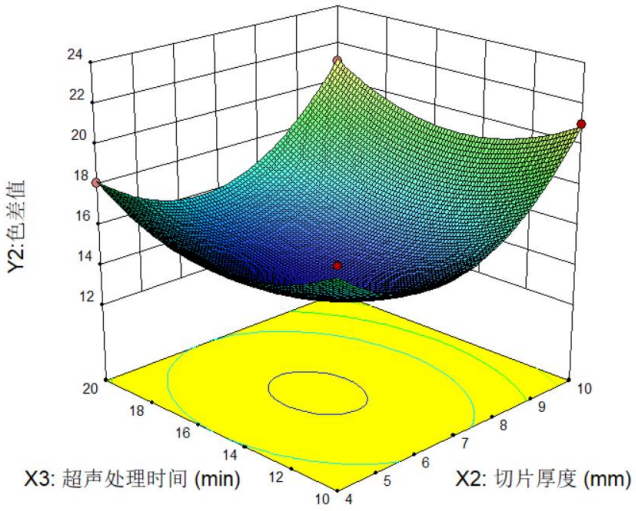
各因素交互作用对色差值的影响如图 4-5 所示，根据等高线的密度与形状可得出，三者中干燥温度（X_1）与超声处理时间（X_3）的交互作用对色差值的影响最大，当超声处理时间固定时，色差值随干燥温度的升高先减少后增大。方差分析结果与响应面分析结果一致，各组交互作用对色差值的影响均不显著（P>0.05）。



a. 干燥温度和切片厚度对色差值的响应面图



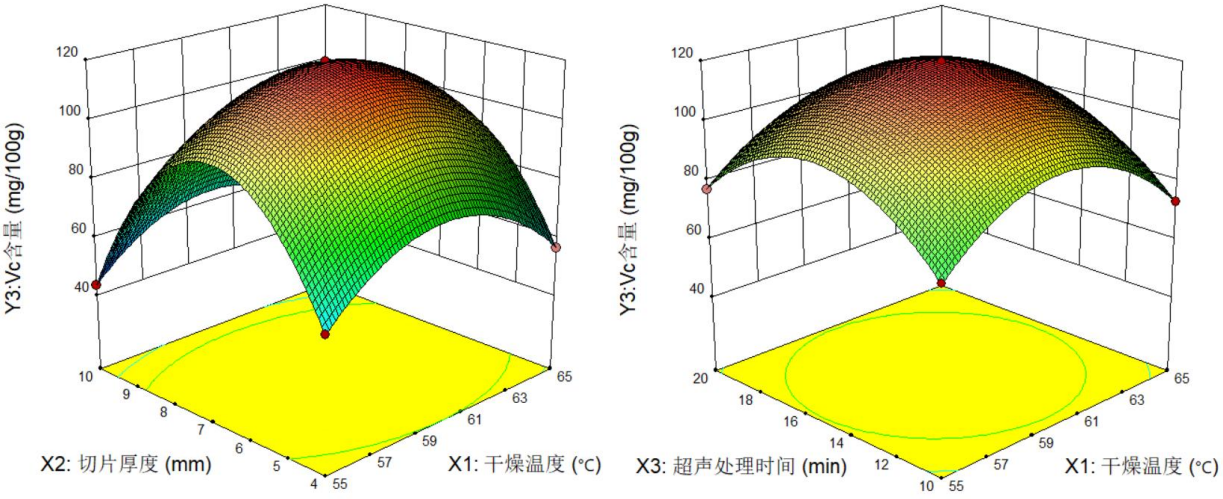
b. 干燥温度和超声处理时间对色差值的响应面图



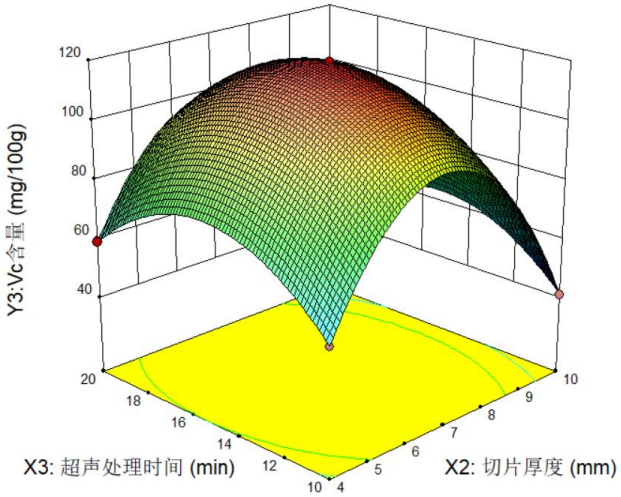
c. 切片厚度和超声处理时间对色差值的响应面图

图 4-5 因素交互作用对色差值的影响
Fig.4-5 Influence of factor interaction on color difference value

各因素交互作用对 Vc 含量的影响如图 4-6 所示，根据等高线的密度与形状可得出，三者中切片厚度（X_2）与超声处理时间（X_3）的交互作用对 Vc 含量的影响最大，当超声处理时间固定时，Vc 含量随切片厚度的增大先增加后减小，且变化程度较大，当切片厚度固定时，Vc 含量随超声处理时间的增大先增加后减小，变化程度较小。同时，方差分析结果与响应面分析结果一致，各组交互作用对 Vc 含量的影响均不显著（P>0.05）。



a. 干燥温度和切片厚度对 Vc 含量的响应面图　　b. 干燥温度和超声处理时间对 Vc 含量的响应面图



c. 切片厚度和超声处理时间对 Vc 含量的响应面图

图 4-6 因素交互作用对 Vc 含量的影响

Fig.4-6 Influence of factor interaction on VC content

4.2.5 工艺参数验证与对比试验

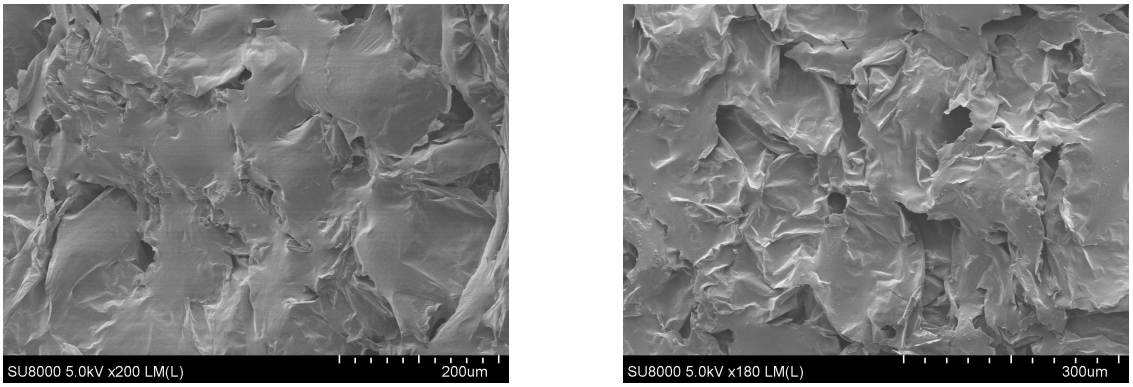
利用 Design-Expert 软件中的优化程序设定参数，根据表 4-2 试验因素设定取值范围，Vc 含量目标参数要求为 maximize，干燥时间、色差值目标参数要求为 minimize，以干燥时间、色差值和 Vc 含量为响应指标，得到优化工艺参数：超声处理时间 15.13 min、干燥温度 60.56 ℃、切片厚度 5.75 mm。为进一步验证回归方程的准确性和有效性，在最佳工艺条件下进行 3 次平行验证试验，为便于实际操作，对各工艺参数取整，超声处理时间为 15 min、干燥温度为 61 ℃、切片厚度为 6 mm，试验结果取平均值进行分析。得到干燥时间 115 min，相对误差为 1.11%，色差值 13.79，

相对误差为 1.74%，Vc 含量 112.1 mg/100 g，相对误差为 1.69%，实际值与模型预测值接近，表明试验所得模型优化出的工艺参数可靠[25,56]。

表 4-6 不同产品的干燥时间和品质对比

Table 4-6 Drying time and quality comparison of different products

预处理方式	干燥时间/min	色差值	Vc 含量/(mg/100g)
对照组	210	15.92	96.05
超声处理	115	13.79	112.1



a. 对照组 b. 超声处理

图 4-7 超声处理对哈密瓜片微观结构的影响

Fig.4-7 Effect of ultrasonic treatment on microstructure of Hami-melon slices

进行对比试验，对经工艺优化后得到的超声处理产品与未经超声处理产品（干燥温度 61 ℃、切片厚度 6 mm）的干燥时间和品质对比分析，见表 4-6。超声处理产品相较于未处理的产品，干燥时间缩短 45.24%，色差减小 13.38%，Vc 含量提高了 16.71%。利用扫描电镜对工艺优化后所得产品的微观组织结构观察分析，如图 4-7 所示。未经超声处理的产品，组织结构致密，孔道结构较少。超声处理产品的结构疏松、细胞塌陷，出现多孔道结构。这是由于进行预处理时，超声波的空化效应引起哈密瓜片内部组织膨胀和收缩，形成了细胞微通道，这有利于干燥时物料内部水分的扩散与蒸发[88,89]。

4.3 本章小结

本章旨在优化哈密瓜超声处理红外干燥工艺，在单因素试验基础上，运用响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计试验优化工艺参数，具体结论如下：

1）单因素试验结果表明，各影响因素对哈密瓜片红外干燥过程影响显著。通过响应面法建立了哈密瓜超声处理红外干燥的干燥时间、色差值、Vc 含量与超声处理时间、干燥温度、切片厚度的回归模型，R^2 分别为 0.999 8、0.999 4、0.999 9。各因素对干燥时间的影响程度从大到小为切片厚度（X_2）、干燥温度（X_1）、超声处理时

间（X_3）且 $X_3^2>X_2^2>X_1^2$；对色差值的影响顺序为 $X_2>X_1>X_3$ 且 $X_1^2>X_2^2>X_3^2$；对 Vc 含量的影响顺序为 $X_2>X_1>X_3$ 且 $X_2^2>X_3^2>X_1^2$；

2）经响应面优化的工艺参数为：干燥温度 61 ℃、切片厚度 6 mm、超声处理时间 15 min，该工艺下得到干燥时间 115 min，相对误差为 1.11%，色差值 13.79，相对误差为 1.74%，Vc 含量 112.1 mg/100 g，相对误差为 1.69%，验证试验所得值与模型预测值接近，表明试验所得模型优化出的工艺参数可靠。相较于未经处理的产品，干燥时间缩短 45.24%，色差减小 13.38%，Vc 含量提高 16.71%，微观结构对比结果显示超声波引起了哈密瓜片内部组织膨胀和收缩，形成了细胞微通道，出现的多孔道结构，可减少水分迁移扩散的阻力，有助于干燥时哈密瓜片内部水分的扩散与蒸发。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

本文针对新疆地区哈密瓜采收期集中，运输等环节易受机械损伤而损耗，以及水分多、含糖量高不易保存的问题，将哈密瓜进行干制，探索解决哈密瓜干制时耗时长以及品质难以保持的新方案。在哈密瓜片干制加工技术的国内外现状的基础上，进行了试验研究，对比分析了四种典型的哈密瓜片干燥技术，确定了红外干燥方法干制哈密瓜片的干燥方法；同时为弥补单一干燥的不足，研究对比了三种常用的干燥预处理方式，将超声处理应用至哈密瓜片的红外干燥中，加速干燥过程并减少其加工后产生的品质劣变。在单因素试验的基础上，采用响应面法对干燥工艺进行优化，并进行对比研究验证了新工艺的优势，为哈密瓜片干制加工的提质增效提供技术和理论参考。主要结论如下：

（1）对比不同干燥方法（FD、IRD、HAD、MVD）对哈密瓜片干燥特性及品质（色泽、质构、复水比、微观结构）的影响，综合比较了各干燥方法的优劣。在相同的温度水平下，FD 耗时最长为 745 min，干燥过程能耗极大，HAD 耗时 345 min，IRD、MVD 干燥过程的水分有效扩散系数较大分别为 1.69×10^{-9}、1.14×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$，表明干燥速率快，干燥耗时短分别为 240 min、36 min。数学模型拟合结果表明，Wang and Singh 模型适用于模拟哈密瓜片 FD、HAD 干燥过程，Logarithmic 模型能更好地描述哈密瓜片 IRD 过程的脱水规律，Page 和 Weibull 模型适用于模拟哈密瓜片 MVD 干燥过程。IRD 产品的各品质均优于 HAD、MVD 产品，FD 产品品质最佳，微观结构观察结果显示，FD 产品较好的保持了原有结构，IRD 对产品的细胞损伤较小且具有一定的膨化作用，HAD、MVD 对产品内部组织结构破坏较大。综合分析得出，IRD 的综合评分最高，可在较短的时间内获得高品质的产品，因此确定红外干燥为哈密瓜片的干燥方法。

（2）对比不同预处理方式（超声处理、烫漂处理、渗透处理）对哈密瓜红外干燥特性及品质（色泽、Vc 含量、质构、复水比）的影响，综合比较了各预处理方式的优劣。超声处理后的哈密瓜片内部组织结构松散，干燥过程中水分更易迁移逸出，因此耗时最短为 160 min，水分有效扩散系数最大为 2.22×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$。烫漂处理组和渗透处理组干燥耗时较长，分别为 225 min、300 min，水分有效扩散系数小分别为 1.54×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$、6.26×10^{-10} $m^2\cdot s^{-1}$，且渗透处理组未能达到干燥终点要求的目标含水率。数学模型拟合结果表明，Page、Weibull 模型适用于描述哈密瓜片超声处理后

IRD 的脱水规律，Two-term 模型最适合被用来模拟哈密瓜片烫漂处理后 IRD 的干燥过程，Logarithmic 和 Two-term 模型能更好的描述哈密瓜片渗透处理后 IRD 干燥过程的水分比变化情况。超声处理组产品的各品质指标较优，但由于超声处理对其内部结构的改变，复水性相较于对照组略低，烫漂处理组产品品质居中，渗透处理组产品的综合品质最差。综合分析，得出超声处理组产品的综合评分最高，因此确定超声处理为哈密瓜片红外干燥的预处理方式。

（3）在单因素试验基础上，运用响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计试验优化超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺。单因素试验结果表明，各影响因素对哈密瓜片红外干燥过程影响显著。通过响应面法建立了哈密瓜超声处理红外干燥的干燥时间、色差值、Vc 含量与超声处理时间、干燥温度、切片厚度的回归模型，R^2 分别为 0.999 8、0.999 4、0.999 9。各试验因素对干燥时间的影响程度从大到小为切片厚度（X_2）、干燥温度（X_1）、超声处理时间（X_3）且 $X_3^2>X_2^2>X_1^2$；对色差值的影响顺序为切片厚度、干燥温度、超声处理时间且 $X_1^2>X_2^2>X_3^2$；对 Vc 含量的影响顺序为切片厚度、干燥温度、超声处理时间（X_3）且 $X_2^2>X_3^2>X_1^2$。经响应面优化的工艺参数为：干燥温度 61℃、切片厚度 6mm、超声处理时间 15min，该工艺下得到干燥时间 115min，相对误差为 1.11%，色差值 13.79，相对误差为 1.74%，Vc 含量 112.1mg/100g，相对误差为 1.69%，验证试验所得值与模型预测值接近，这表明试验所得模型优化出的工艺参数可靠。相较于未经处理的产品，干燥时间缩短 45.24%，色差减小 13.38%，维生素 C 含量提高 16.71%，微观结构对比结果显示超声波引起了哈密瓜片内部组织膨胀和收缩，形成细胞微通道，出现的多孔道结构，可减少水分迁移扩散的阻力，有助于干燥时哈密瓜片内部水分的扩散与蒸发。

5.2 展望

本文提出了一种哈密瓜片干制的新工艺，将超声预处理应用至哈密瓜片的红外干燥中，在拥有较短干燥时间的同时能够获得高品质的哈密瓜干制品。但由于研究时间和相关设备技术有限，本研究的工作中还存在不足之处，有待改进：

（1）在哈密瓜片干制试验方面，仅考虑了三种单一预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响，后续应进一步研究其他预处理以及多种组合预处理，同时完善干燥过程能耗以及成本的核算，为哈密瓜干制加工的提质增效提供更完善的技术和数据支撑；

（2）在工艺优化试验方面，选定了三个影响因素（超声处理时间、干燥温度、切片厚度）与三个评价指标（干燥时间、色差、Vc 含量），后续研究可增加考虑如超声处理功率等其他影响因素，同时完善多种品质以及营养元素指标的检测，进一步

提高干制品品质，缩短干燥过程。

参考文献

[1] 廖新福,刘曼双.新疆哈密瓜产业现状及发展对策[J].新疆农业科技,2011(03): 1-2.

[2] 李小霞,马本学,王文霞,等.哈密瓜在线检测输送翻转装置的设计与试验[J].机械设计与制造,2021(01):20-23.

[3] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴 2020[M].北京，中国统计出版社，2020.

[4] 常安太,郑霞,肖红伟,等.哈密瓜干燥技术现状与装备研究展望[J].包装与食品机械,2020,38(06):61-67.

[5] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 262-269.

[6] Chang Antai, Zheng Xia, Xiao Hongwei, et al. Short- and Medium-Wave Infrared Drying of Cantaloupe (Cucumis melon L.) Slices: Drying Kinetics and Process Parameter Optimization[J]. Processes, 2022, 10(1).

[7] Deng L Z, Arun S. Mujumdar, Zhang Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes-a comprehensive review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 1-25.

[8] 贾文婷,杨慧,吴洪斌,等.不同预处理方式对新疆地区哈密瓜变温压差膨化干燥的影响[J].江苏农业科学,2016,44(04):338-340.

[9] 金听祥,王广红,彭钰航,等.不同预处理方式对胡萝卜热泵干燥品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(07):173-178.

[10] 戴澄. 超声波辅助预处理及冷冻对冻干胡萝卜影响的研究[D].上海理工大学,2016.

[11] 马有川.预处理对苹果脆片真空冷冻干燥特性和品质的影响研究[D].中国农业科学院,2021.

[12] 孟繁博,黄道梅,郑秀艳,等.超声波预处理对热风干燥火龙果片品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(13):205-209.

[13] 徐汝祯.预处理对热风和射频真空干燥的猕猴桃切片品质的影响研究[D].西北农林科技大学,2020.

[14] 苑丽婧,何秀,林蓉,等.超声预处理对猕猴桃水分状态及热风干燥特性的影响[J].农业工程学报,2021,37(13):263-272.

[15] 文怀兴,高举,俞祖俊.真空低温干燥工艺参数对红枣切片品质的影响[J].食品工业，2016,37(11) :107-110.

[16] 高静静,冯作山,白羽嘉.真空冷冻和热风干燥对哈密瓜片品质的影响[J].保鲜与加工,2020,20(03):78-84.

[17]赵艳雪,余金橙,刘士琪,等.山楂切片冷冻干燥动力学与品质特性研究[J].食品研究与开发,2021,42(02):53-60.

[18]陈佳楠.菠萝切片真空冷冻干燥工艺研究及优化[D].天津商业大学,2022.

[19]QUISPE-FUENTES I, VEGA-GÁLVEZA A and ARANDA M, 2018. Evaluation of phenolic profiles and antioxidant capacity of maqui (Aristotelia chilensis) berries and their relationships to drying method[J]. Journal Science of Food Agriculture, 98(11): 4168-4176.

[20]万江静,郑霞,高振江,等. 红枣片远红外辐射干燥的干燥特性及 Vc 变化[J]. 食品工业科技,2016,36(8) :110-115.

[21]武华文.哈密瓜片远红外干燥特性及品质工艺试验研究[D].塔里木大学,2020.

[22]Chen Q Q, Song H H, Bi J F, Chen R J, Liu X, Wu X Y, Hou H N. Multi-Objective Optimization and Quality Evaluation of Short- and Medium-Wave Infrared Radiation Dried Carrot Slices[J]. International Journal of Food Engineering, 2019, 15(8).

[23]Shi X W, Liu Y H, Li Z Y, et al. Effects of radiation temperature on dehydration and moisture migration in banana slices during far‐infrared radiation drying[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(11): 1-11.

[24]郑霞.基于不同干燥技术的红枣泥片干燥特性及品质研究[D].中国农业大学,2015.

[25]常安太.哈密瓜片红外热风联合干燥动力学及工艺参数优化[D].石河子大学,2022.

[26]张雪波,刘显茜,邹三全,等.哈密瓜切片热风干燥特性及数学模型[J].食品与机械,2022,38(02):130-136+142.

[27]王莹,吴立国,孙丽萍,等.基于 Weibull 函数的平贝母热风干燥特性[J].农机化研究,2022,44(05):249-254.

[28]MICHALSK A, WOJDYŁO A, LECH K, GRZEGORZ P Ł and FIGIEL A, 2017. Effect of different drying techniques on physical properties, total polyphenols and antioxidant capacity of blackcurrant pomace powders. LWT-Food Science and Technology, 41(9): 114-121.

[29]刘德成. 冷冻-红外分段组合干燥红枣片干燥特性及品质研究[D].石河子大学,2022.

[30]金敬红,范小东,陈文华,等.不同预处理方式对微波干燥哈密瓜品质的影响[J].中国野生植物资源,2020,39(04):32-35.

[31]王亚娟,张凤娟,滕建文,等.胡萝卜片微波真空干燥动力学数值拟合[J].食品工业科技,2020,41(18):17-23.

[32]Magdalena Zielinska, Danuta Zielinska. Effects of freezing, convective and microwave-vacuum drying on the content of bioactive compounds and color of cranberries[J]. LWT, 2019, 104: 202-209.

[33]Zhao Y T, Gao R, Zhuang W J, et al. Combined single-stage tempering and microwave vacuum drying of the edible mushroom Agrocybe chaxingu: Effects on drying

characteristics and physical-chemical qualities[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2020, 128: 109372.

[34]郝启栋,乔旭光,郑振佳,等.超高压和超声波预处理对蒜片热风干燥过程及品质的影响[J].农业工程学报,2021,37(03):278-286.

[35]魏明,张倩,钱森和,等.不同预处理对铁皮石斛热风干燥特性及品质的影响[J].农业工程学报,2022,38(08):281-287.

[36]索浩然.超声波预处理对铁皮石斛干燥特性及品质的影响[D].安徽工程大学,2020.

[37]张振亚,韩琭丛,金听祥,等.超声预处理对热泵干燥菠萝品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(12):111-116.

[38]周峴,孙艳辉,蔡华珍,等.超声波预处理对苹果片真空冷冻干燥过程的影响[J].食品工业科技,2015,36(22):282-286.

[39]陈文敏,彭星星,马婷,等.超声处理对中短波红外干燥红枣时间及品质的影响[J].食品科学,2015,36(08):74-80.

[40]Ren Z Y, Bai Y X. Ultrasound Pretreatment of Apple Slice Prior to Vacuum Freeze Drying[C]. 2nd International Conference on Material Science, Energy and Environmental Engineering, 2018, 112-117.

[41]ERHAN H, HAWAR JJ, MEDENI M. Ultrasonication as pretreatment for drying of tomato slices in a hot air-microwave hybrid oven [J]. Drying Technology, 2017, 35(7): 849-859.

[42]任旭,谢蔓莉,叶发银,等.烫漂方式对苹果脆片褐变和多酚及其抗氧化活性的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(01):161-168.

[43]王怡,董继先,王栋,等.微波烫漂预处理下百合热风干燥特性及动力学模拟[J].食品工业科技,2021,42(03):186-190+200.

[44]张迎敏,任广跃,屈展平,等.超声和烫漂预处理对红薯叶热风干燥的影响[J].食品与机械,2019,35(12):194-201.

[45]Ren,F.Y, Perussello,C.A., Zhang,Z.H, et al. Enhancement of phytochemical content and drying efficiency of onions (Allium cepa L.) through blanching[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,98(4):1300-1309.

[46]Liu J, Wang R, Wang X, et al. 2019b. Effect of blanching and drying temperatures on the browning-related enzymes and physicochemical properties of lily bulb flours[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 43(12): e14248.

[47]宋璐瑶.芒果真空预处理联合超声辅助渗透脱水及水分迁移规律的研究[D].浙江大学,2021.

[48]Derossi, A., Severini, C., Del Mastro, A., De Pilli, T. 2015. Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach[J]. LWT-Food Science and Technology, 60(2): 641-648

[49]Lyu J, Chen Q Q, Bi J F, Zeng M C, Wu X Y. Drying Characteristics and Quality of Kiwifruit Slices with/without Osmotic Dehydration under Short- and Medium-Wave Infrared Radiation Drying[J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(8), 1-15.

[50]毕金峰,方芳,丁媛媛,等.预处理对哈密瓜变温压差膨化干燥产品品质的影响[J].食品与机械,2010,26(02):15-18.

[51]温馨,胡锐,赵金红,等.不同漂烫方式结合 $CaCl_2$ 预处理对哈密瓜品质的影响[J].农业机械学报,2014,45(10):231-237.

[52]崔彩云,卢根昌,高东江,等.哈密瓜真空冷冻干燥工艺[J].食品研究与开发,2009,30(11):100-102.

[53]GABRIELLA D D S, BARROS Z M P, DE MEDEIROS R A B, et al. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 74: 114-119.

[54]Bai J W, Sun D W, Xiao H W, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 20:230-237.

[55]戚思影. 低频超声预处理对脱水香菇品质及风味的影响[D].扬州大学,2021.

[56]刘德成,郑霞,肖红伟,等.红枣片冷冻-红外分段组合干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 293-302.

[57]CHEN Q, BI J, WU X, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short-and medium-wave infrared radiation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759-766.

[58]牛玉宝,姚雪东,肖红伟,等.射频辅助热风干燥对红枣脆片质构特性和微观结构的影响[J].农业工程学报,2022,38(02):296-306.

[59]钱婧雅，张茜，王军，等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J].农业工程学报，2016，32(17):259-265.

[60]Przybył, K., Gawałek, J., Koszela, K., et al. (2018).Artificial neural networks and electron microscopy to evaluate the quality of fruit and vegetable spray-dried powders. Case study:Strawberry powder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 155, 314-323.

[61]李远志,蔡颖荷,鲍金勇,等.哈密瓜片干燥特性的研究[J].食品与机械,2005(04):32-34.

[62]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.3-2016.食品安全国家标准食品中水分的测定[S].北京:中国标准出版社,2017.

[63]张茜,肖红伟,代建武,等.哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J].农业工程学报,2011,27(增刊):382-388.

[64]Xiao H W, Law C L, Sun D W, et al.Color change kinetics of American ginseng (Panax quinquefolium) slices during air impingement drying[J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418-427.

[65]LYU J, ZHOU L Y, BI J F, et al. Quality evaluation of yellow peach chips prepared by explosion puffing drying[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(12): 8204-8211.

[66]巨浩羽,赵海燕,张卫鹏,等.相对湿度对胡萝卜热风干燥过程中热质传递特性的影响[J].农业工程学报,2021,37(5):295-302.

[67]Onwude D I, Hashim N, Abdan K, Janius R, Chen G. Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: Kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54, 2917-2933.

[68]Doymaz I. Infrared drying of kiwifruit slices[J]. International Journal of Green Energy, 2018, 15(11): 622-628.

[69]Cao Z Z, Zhou L Y, Bi J F, Yi J Y, Chen Q Q, Wu X Y, Zheng J K, Li S R. Effect of different drying technologies on drying characteristics and quality of red pepper (*Capsicum frutescens L.*): a comparative study[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(10): 3596-3603.

[70]Royen M J, Noori A W, Haydary J. Experimental Study and Mathematical Modeling of Convective Thin-Layer Drying of Apple Slices[J]. Processes, 2020, 8(12): 1562.

[71]徐明月,郑金铠,毕金峰,等.柑橘皮中短波红外干燥特性和品质研究[J].中国食品学报,2017,17(08):64-73.

[72]Doymaz I. Infrared drying of kiwifruit slices[J]. International Journal of Green Energy, 2018, 15(11): 622-628.

[73]Onwude D I, Hashim N, Abdan K, Janius R, Chen G. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 75-87.

[74]吴靖娜,陈晓婷,潘南,等.不同干燥方式下海马干燥特性及其数学模型[J].现代食品科技,2020,36(12):133-142.DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.12.0583.

[75]Duan X, Zhang M, Mujumdar A S. Study on a combination drying technique of sea cucumber[J]. Drying Technology, 2014.10, 2010-2019.

[76]侯皓男,毕金峰,陈芹芹,等.压差闪蒸干燥改善红枣脆片理化和营养品质的研究[J].现代食品科技,2019,35(11):1-10.

[77]王磊,沈柳杨,郑先哲,等.微波干燥浆果过程中料层电场分布影响能量利用分析[J].农业工程学报,2021,37(4):1-10.

[78]汤诗琪.哈密瓜风干片贮藏过程中品质变化及褐变机理研究[D].重庆:重庆大学,2018:3-5.

[79]齐琳琳.以干香菇为原料的香菇脆片加工工艺研究[D].无锡:江南大学,2013.

[80]LiuYH, Wu J Y, Miao S A, et al. Effect of a Modified atmosphere on drying and quality characteristics of carrots [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(9): 2549-2559.

[81]PENG J, BI J F, YI J Y, WU X Y, ZHOU M, LYU J, LIU J N, 2018. Engineering Texture Properties of Instant Controlled Pressure Drop (DIC) Dried Carrot Chips via Modulating Osmotic Conditions[J]. Food and Bioprocess Technology, 11(9): 1674-1685.

[82]陈学玲,黄文俊,钟彩虹,等.超声预处理对真空冷冻干燥猕猴桃片品质的改善作用[J].食品安全质量检测学报,2022,13(16):5314-5319.

[83]刘云宏,孙畅莹,曾雅.直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响[J].农业工程学报,2018,34(19):284-292.

[84]段续,徐一铭,任广跃,等.香菇分段变温红外喷动床干燥工艺参数优化[J].农业工程学报,2021,37(19):293-302.

[85]Wu X F, Zhang M, Bhandari B, et al.A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energyconsumption and keep the quality of Cordyceps militaris[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2019, 54: 34-42.

[86]Wang X Y, Gao Y N, Li X H, et al.Effect of different drying methods on the quality and microstructure of fresh jujube crisp slices[J].Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45: e15162.

[87]白俊文,周存山,蔡健荣,等.南瓜片真空脉动干燥特性及含水率预测[J].农业工程学报,2017,33(17): 290-297.

[88]宋悦,金鑫,毕金峰,等.超声辅助渗透处理对热风干燥及真空冷冻干燥黄桃片品质的影响[J].食品科学,2020,41(15):177-185.

[89]刘云宏,李晓芳,苗帅,等.南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J].农业工程学报,2016,32(10):277-286.

致谢

在论文完成之际，衷心感谢我的导师郑霞教授在四年的本科学习生活以及三年的研究生学习生活中对我的教导，郑老师不仅在学术上给予我耐心的指导，在生活上也给予我无微不至的关怀，指导我顺利的完成了学业。本论文是在郑老师的悉心指导下完成的，从课题选择、综述调研、论文开题、试验安排以及论文撰写等环节，郑老师均给予了宝贵的指导和帮助。再次向恩师致以最诚挚的谢意！

感谢石河子大学和机械电气工程学院提供的温馨良好的学习和生活氛围以及科研平台。衷心感谢姚雪东、张茜等老师给予的无私指导与大力帮助；感谢刘德成、常安太等师兄对我学习生活的帮助；感谢李祥雨、臧永镇、谭舒丹等同窗在生活、学习以及试验中的帮助；感谢团队成员杨涛庆、张继凯等师弟在试验方案中的积极交流、以及学习上的包容和帮助；感谢室友王光恒、冯迎洲在生活上的包容与帮助！感谢鲍振宾、丁惠哲等好友在读研期间的帮助与陪伴！感谢所有指导我的老师和专家评委！感谢与我一起度过三年研究生生活的同学和朋友们！让我们珍惜当下，不惧未来！愿你们学习进步，事业有成！

衷心感谢我的家人在我求学期间的支持与理解，感谢父母的养育之恩，愿父母身体健康，工作顺利！

在未来的学习和工作道路上，我将铭记和感恩所有关心帮助过我的老师、同学、朋友和家人！这将是我勇敢向前，不懈努力的动力源泉！

祝福你们身体健康，工作顺利，生活愉快！

李义璨

2023 年 5 月于石河子大学

作者简介

李义璨，男，汉族，中共党员，生于 1998 年 11 月，籍贯山东省烟台市。2016 年 9 月~2020 年 6 月，就读于石河子大学机械电气工程学院机械设计制造及其自动化专业，期间加入中国共产党，并获工学学士学位；2020 年 9 月~2023 年 6 月，就读于石河子大学机械电气工程学院机械专业攻读专业型硕士学位，从事农产品加工技术与装备方向研究。

在学期间参与的研究项目

1.主要参与了枣片红外干燥装备的中试与推广（项目编号 CGZH201808），石河子大学工科专项的研究工作。

2.参与了射频热处理对新疆枣片干燥过程中质地结构与热特性参数影响规律研究，国家自然科学基金项目（31960488）的研究工作。

在学期间发表的文章

1.**李义璨**,郑霞*,姚雪东,杨涛庆,张继凯.超声预处理哈密瓜片红外干燥工艺优化[J].食品与机械,2023,39(03):201-206+240.

2.刘德成,郑霞*,肖红伟,姚雪东,单春会,常安太,**李义璨**,李祥雨.红枣片的冷冻－红外分段组合干燥工艺研究[J].农业工程学报.

3.Chang, A.; Zheng, X*.; Xiao, H.; Yao, X.; Liu, D.; Li, X.; **Li, Y**. Short- and Medium-Wave Infrared Drying of Cantaloupe (Cucumis melon L.) Slices: Drying Kinetics and Process Parameter Optimization[J]. Processes, 2022, 10(1).

获奖情况

1.2020 年获得研究生三等学业奖学金；

2.2020 年获得全国三维数字化创新设计大赛新疆赛区二等奖；

3.2021 年获得优秀党务工作者荣誉证书；

4.2022 年被表彰为“山东省疫情防控优秀青年志愿者”；

5.2022 年获得全国三维数字化创新设计大赛总决赛三等奖。

石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表

研究生姓名	李义璨	学制	3
专业	机械	研究方向	机械工程

学术评语：

该论文针对哈密瓜干燥工艺，开展了预处理对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响研究。

论文研究了不同干燥方法对哈密瓜片干燥特性及品质的影响；研究了超声处理、烫漂处理、渗透处理三种干燥预处理方式对哈密瓜片红外干燥特性及品质的影响；在单因素试验的基础上，运用响应面法研究和优化了超声预处理红外干燥工艺。研究结果对哈密瓜片干制加工提供了一定的参考价值。

论文研究目标明确，研究方案较合理。论文结构较合理，撰写规范，数据图表运用规范。

指导教师签字: 郑霞

2023 年 5 月 17 日