分类号：S23　　密　　级：公开
学　号：20212109026　　单位代码：10759

石河子大学
硕士学位论文

小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥特性及品质研究

学位申请人　何睿颖
指导教师　张茜 教授
刘信君 工程师

申请学位类别　专业硕士
专业名称　机械
研究领域　农业机械化工程
所在学院　机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2024 年 5 月

分类号：S23　　密　　级：公开
学　号：20212109026　　单位代码：10759

石河子大学
硕士学位论文

小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥特性及品质研究

学位申请人　何睿颖
指导教师　张　茜 教　授
刘信君 工程师
申请学位类别　专业硕士
专业名称　机　械
研究领域　农业机械化工程
所在学院　机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2024 年 5 月

Combined Vacuum Freezing and Microwave Vacuum Drying of Small White Apricot: Effect of Drying characterization and quality Attributes

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

He Rui-ying

（Mechanical engineering）

Dissertation Supervisor: Prof. Zhang qian

May,2024

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：何睿敏　　时间：2024 年 5 月 15 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：何睿敏　　时间：2024 年 5 月 15 日

导师签名：张苗　　时间：2024 年 5 月 15 日

摘要

小白杏含有丰富的营养物质，含糖量高，湿基含水率在80%左右，采摘期集中且需经长久的运输，容易导致果肉发生褐变，后熟变软，腐败变质。杏果的含糖量、有机酸含量等也随贮藏时间的延长而下降，通过制作成小白杏干可以解决上述问题。干制处理在防止霉菌滋生腐烂、延长产品保质期的同时，提升产品价值，进一步丰富产业结构。采用多种干燥技术的联合干燥是一种有效的策略，充分利用各种干燥方式的优点，最小化干燥所需的时间，并提高干燥的品质。在此研究中，首先对现有的杏果干燥方法以及真空冷冻-微波真空联合干燥（FD-MVD）的研究状况进行深入探讨，然后研究不同干燥条件下小白杏干燥特性，并采用响应面法来优化小白杏的FD-MVD工艺，最后对比了FD-MVD干燥产品和小白杏干制品在单一干燥方法下的品质差异。这些结果提供了一个理论基础和技术参考，以便开发出一种能有效提高小白杏干燥效果和质量的联合干燥工艺。

（1）分析小白杏在不同干燥条件下的FD-MVD干燥特性。转换点含水率与干燥时间呈现出负相关变化，转换点含水率在65%降到45%的过程中，干燥时间从3.67h增至7.18h。不同的微波功率条件下（300W、400W、500W、600W、700W），干燥时间随微波功率的增加而减少，干燥速率随微波功率的增加而增加；相应的水分有效扩散系数则由$1.92\times10^{-7}m^2/s$增至$3.93\times10^{-7}m^2/s$。在不同微波温度条件下（40℃、50℃、60℃），微波温度越大，干燥速率越大，水分比下降速率越快，干燥时间越短。当温度由40℃升高到60℃时，其值则由2.32×10^{-7}m2/s增加至$2.81\times10^{-7}m^2/s$。

（2）通过计算不同转换点含水率、微波功率、微波温度干燥条件下小白杏联合干燥过程中的水分比，拟合比较12种常用的干燥模型，选取决定系数R^2、离差平方χ^2与均方根误差*RMSE*来评价模型的拟合精度。发现Midilli模型最适合描述不同干燥条件下小白杏FD-MVD的降水过程，可用于预测小白杏联合干燥过程失水率的变化过程。

（3）小白杏FD-MVD的工艺参数利用响应曲面法，在单因素试验的研究结果基础上进行优化，构建了相关回归模型，并获得最优工艺参数：转换点含水率为61%、微波功率为400W、微波温度为42℃。此参数下的理论值与实际值相近，表明该回归模型可靠。并与Midilli模型进行拟合，建立小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的数学模型。

（4）对比了小白杏在不同干燥方法下（HAD、IRD、MVD、FD、FD-MVD）的干制品品质（色泽、复水性、维生素C及可滴定酸的含量、微观结构）。表明真空冷冻-微波真空联合干燥比其他干燥方式具有明显优势，对提升小白杏的干燥速率、缩短干燥时间、提高干制品品质有重要意义。

关键词：小白杏；真空冷冻-微波真空联合干燥；干燥特性；干燥动力学；品质

Abstract

Small white apricots contain rich nutrients, high sugar content, wet base moisture content of about 80%, picking period is concentrated and need to be transported for a long time, which will easily lead to browning of the flesh, after ripening and softening, corruption and deterioration. The sugar content and organic acid content of apricot fruits also decrease with the extension of storage time, and the above problems can be solved by making dried apricots into small white apricots. Drying treatment prevents mold growth and decay and extends the shelf life of the product while enhancing the value of the product and further enriching the industrial structure. Joint drying using multiple drying techniques is an effective strategy to make full use of the advantages of various drying methods, minimize the time required for drying, and improve the quality of drying. In this study, the existing methods of apricot fruit drying and the research status of vacuum freezing-microwave vacuum combined drying (FD-MVD) were firstly discussed in depth, then the drying characteristics of small white apricots were investigated under different drying conditions, and the response surface method was used to optimize the FD-MVD process for small white apricots, and finally, the quality differences between the FD-MVD-dried products and the small white apricot dried products under a single drying method were compared. . These results provide a theoretical basis and technical reference for the development of a combined drying process that can effectively improve the drying effect and quality of small white apricots.

(1) The FD-MVD drying characteristics of white apricot under different drying conditions were analyzed. With the decrease of the moisture content of the transition point, the drying time showed an increasing trend. When the moisture content of the transition point dropped from 65% to 45%, the drying time increased from 3.67h to 7.18h accordingly. Under different microwave power conditions (300W, 400W, 500W, 600W, 700W), drying time decreases with the increase of microwave power, drying rate increases with the increase of microwave power; The corresponding effective diffusion coefficient of water increased from $1.92\times10^{-7}m^2/s$ to $3.93\times10^{-7}m^2/s$. Under different microwave temperature conditions (40℃, 50℃, 60℃), the higher the microwave temperature, the greater the drying rate, the faster the water ratio decline rate, the shorter the drying time. When the temperature rises from 40℃ to 60℃, its value increases from $2.32\times10^{-7}m^2/s$ to $2.81\times10^{-7}m^2/s$.

(2) By calculating the moisture ratios in the combined drying process of small white apricots under different conversion point moisture content, microwave power, and microwave temperature drying conditions, 12 commonly used drying models were fitted and compared, and the coefficient of determination, the squared deviation and the root mean square error RMSE were selected to evaluate the fitting accuracy of the models. It was found that the Midilli model was most suitable for describing the

precipitation process of FD-MVD of small white apricot under different drying conditions, and could be used to predict the process of water loss ratio in the combined drying process of small white apricot.

(3) Based on the results of single factor experiment, the response surface method was used to optimize the FD-MVD process parameters of little white apricot, and the regression model of three factors was established. The optimal process parameters were obtained: the water content at the conversion point was 61%, the microwave power was 400W, and the microwave temperature was 42℃. The theoretical values under these parameters were close to the actual values, indicating that the regression model was reliable. By fitting with Midilli model, the mathematical model of vacuum freezing and microwave-vacuum drying of small white apricot was established.

(4) The dry product quality (color, rehydration, content of vitamin C, titrable acid and microstructure) under different drying methods (HAD, IRD, MVD, FD, FD-MVD) was compared. The results showed that the combination of vacuum freezing and microwave vacuum drying had obvious advantages over other drying methods, and it was of great significance to improve the drying rate, shorten the drying time and improve the quality ofdried apricot.

Key words:small white apricot; FD-MVD; drying characteristics; drying kinetics; quality

目 录

摘要 I
Abstract II
第 1 章 绪论 1
1.1 研究背景及意义 1
1.2 杏干燥方法研究现状 2
1.3 果蔬真空冷冻-微波真空联合干燥技术研究现状 4
1.4 研究内容及技术路线 6
1.4.1 研究目标 6
1.4.2 研究内容 6
1.4.3 研究方法 7
1.4.4 技术路线 8
1.5 本章小结 8
第 2 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥特性研究 9
2.1 材料与方法 9
2.1.1 试验材料 9
2.1.2 仪器设备 10
2.1.3 试验方法 10
2.1.4 试验参数测定 11
2.1.5 统计分析方法 13
2.2 结果与讨论 13
2.2.1 不同转换点含水率对小白杏 FD-MVD 干燥特性的影响 13
2.2.2 不同微波功率对小白杏 FD-MVD 干燥特性的影响 16
2.2.3 不同微波温度对小白杏 FD-MVD 干燥特性的影响 19
2.3 本章小结 21
第 3 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥动力学模型研究 22
3.1 材料与方法 22
3.1.1 试验材料 22
3.1.2 仪器设备 22
3.1.3 试验方法 22
3.1.4 试验参数测定 22

3.2 干燥模型基础理论 23
3.2.1 常见干燥模型 23
3.2.2 模型评价指标 23
3.3 数据处理与统计分析 24
3.4 结果与讨论 24
3.4.1 不同转换点含水率下模型的建立 24
3.4.2 不同微波功率下模型的建立 28
3.4.3 不同微波温度下模型的建立 33
3.5 本章小结 36
第 4 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥工艺优化 37
4.1 材料与方法 37
4.1.1 试验材料 37
4.1.2 试验试剂 37
4.1.3 仪器设备 37
4.1.4 试验方法 38
4.1.5 试验参数测定 38
4.1.6 统计分析方法 39
4.2 结果与讨论 39
4.2.1 单因素试验结果与分析 39
4.2.2 响应面试验设计与结果 42
4.2.3 回归模型拟合及方差分析 43
4.2.4 各因素交互作用分析 45
4.2.5 FD-MVD 干燥工艺参数优化及试验验证 48
4.3 本章小结 49
第 5 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥品质分析 50
5.1 材料与方法 50
5.1.1 试验材料 50
5.1.2 试验试剂 50
5.1.3 仪器设备 50
5.1.4 试验方法 51
5.1.5 试验参数测定 51
5.1.6 统计分析方法 52
5.2 结果与分析 53
5.2.1 小白杏不同干燥方法下的色泽分析 53

5.2.2 小白杏不同干燥方法下的复水分析 54
5.2.3 小白杏不同干燥方法下的营养成分分析 55
5.2.4 小白杏不同干燥方法下的微观结构分析 56
5.3 本章小结 57
第 6 章 结论与展望 59
6.1 结论 59
6.2 展望 60
参考文献 61
致谢 67
作者简介 69

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

杏（*Prunus armeniaca L.*）属蔷薇科，李属[1]，是生长于温带和亚热带地区的一种水果，遍布世界各地。自古以来新疆就是中国乃至世界重要的杏果产区，因其为世界杏属植物起源中心之一，蕴含着悠久的栽培历史，丰富的品种资源，优质的果品深受广大消费者的喜欢和青睐[2]。截至到 2020 年年底，新疆杏园面积已达 300 万亩，年产量已逾 100 万吨，无论是种植面积还是产量，都位居全国各省(区)第一[3]。新疆有杏 117 种，其中以小白杏最为有名，主要来自产地在阿克苏地区的库车县和巴音郭楞蒙古自治州的轮台县[4]。小白杏（*Prunus armeniaca*），果实呈卵圆形，平均单果重 15.8g，果面淡黄色，无绒毛；果肉黄白色，酸甜可口，有香气，风味独特[5]，营养价值高，含有丰富的类胡萝卜素、维生素 C（Vitamin C，Vc）、糖类、铁、钾和矿物质等营养成分[6, 7]。

杏子是呼吸跃变型果实，收获后呼吸旺盛，会迅速软化[8]。采收期集中在夏季高温期，杏皮十分娇嫩，果实含水量在 80%以上，果皮及果肉存在极易褐变、后熟变软、易腐烂等品质问题，所以贮藏期一般为 3~5d。随着贮藏时间的延长，杏果含糖量、有机酸含量和香味都有所下降[9]，对其鲜食品质和营养价值产生很大的影响。新疆地域广阔，鲜果需远距离运输，运输过程中易出现损伤、软化和腐败等病害，使得杏的鲜食鲜销困难较大，导致每年损耗约 11%[10]，怎样减少杏果的浪费是一个亟待解决的问题。杏果采收量大和货架期短之间的矛盾制约了新疆杏业的发展，而将其干燥后，既能有效地保留其自身的营养成份，又便于储存运输，使损耗量大大减少[11]。

杏类果品干燥技术发展较慢，现主要以自然晾晒与热风干燥为主[12]，自然晾晒时间长，褐变严重[13]，工艺干燥技术落后，加工生产容易受天气和晾晒环境影响，干制品质难以保证。目前小白杏干制品加工程度较低，产品较为单一，产品技术含量低，且达不到工业化生产要求。因此，将现代化食品加工技术应用于小白杏干加工的研究有一定必要性。目前，在果蔬干燥中使用的方法有：自然晾晒、热风干燥、微波真空干燥、冷冻干燥等，其中冷冻干燥（Freeze Drying，FD）是保持食品原有营养成分的最佳方式[14]。红外干燥（Infrared Drying，IRD）存在干燥效率低、热量分配不均匀等问题[15]。热风干燥（Hot Air Drying，HAD）是一种成本低廉的干燥方法[16]。微波真空干燥（Microwave Vacuum Drying，MVD）具有快速干燥的特点[17]。然而，小白杏为高含糖量水果，其蕴含的营养成分又有较强的热敏性，而现有的单一干燥工

艺的弊端在于着干燥过程冗长、营养物质损失大、内部结构坍塌、色泽差异大及风味不佳等。因此，研制出干燥时间短、口感好、营养丰富的小白杏产品是非常有意义的。

分阶段联合干燥是把两种或多种不同的干燥方式进行分段串联，组合形成的一种新型干燥工艺。该工艺可以很好的实现对整个干燥过程的控制，分析了各种干燥技术的优劣处，在不同干燥时期应用不同的干燥方法，提高干燥效率、改善产品质量、节约能源成本[18]。冷冻干燥（FD）是干燥工艺中对果蔬品质影响最低的工艺之一，在低温条件下，让果蔬中的水分发生升华和转移，保持了其原有的微观结构和孔隙结构，其干制品的物理特性均优于其他果蔬干燥工艺，但 FD 后期干燥缓慢，耗时长，能耗高[19]。微波真空干燥（MVD）是指以微波为热源，在真空环境中对物料进行由内而外快速均匀的加热，从而使物料脱水的干燥技术,具有加热效率高、速率快等特点[20]。真空冷冻-微波真空联合干燥（Microwave vacuum freeze-drying，FD-MVD）它是把 FD 与 MVD 结合起来，进行分段组合，以实现两种干燥方式的优势互补。在前期干燥过程中，通过真空冷冻干燥脱除物料中大部分游离水，而后利用微波真空技术脱除残余水分，依靠微波的渗透性，快速、有效地渗入物料内部[21]，并将辐射能转化为热能，以达到物料内外同时加热，加速水分扩散与蒸发。将这一技术应用于食品干燥中，可大大缩短干燥周期并降低能耗。FD-MVD 成功地结合了 FD 干制品的高品质和 MVD 干燥的高效率，确保了果蔬的干燥品质，同时也大大减少了干燥所需的时间。至今，关于小白杏 FD-MVD 的干燥技术，还没有一个完整的研究报告。本试验对其干燥过程进行了初步探讨，旨在为进一步深入研究奠定基础。

综上所述，本论文首先选择 FD 与 MVD 进行联合干燥的方法，应用于小白杏干燥加工；其次，分析不同转换点含水率、微波功率和微波温度下的干燥特性；在单因素试验的基础上，使用响应面法优化联合干燥工艺，以获得干燥质量更好、干燥时间更短的 FD-MVD 工艺参数；同时选取果蔬常用干燥模型，研究了在不同转换点含水率、微波功率及微波温度下的干燥模型拟合情况，并确定描述干燥过程的最佳模型；最后，分析在最优干燥工艺参数下联合干燥的小白杏干制品品质，并与单一干燥方法下的小白杏干进行品质比对，验证联合干燥的优越性，有望在充分发挥 MVD 优势的前提下，缩短 FD 干燥时间，提高产品质量，实现“提质增效”，为开发高质量的速食型果蔬休闲食品——小白杏干提供理论依据和技术支持。

1.2 杏干燥方法研究现状

杏果的传统干燥技术主要包括自然晾晒、熏硫后晾晒和烘干房干燥等方法，但这些方法生产的杏干产品容易受到天气的影响，干燥周期长，硫含量高，造成干燥产品品质不佳。国内外许多学者以改善杏干制品品质为目的，尝试研究了其他的干燥方法。

过利敏等[22]通过研究双波太阳能干燥下的杏干制品，发现将干燥温度控制在40℃至 60℃之间，杏果脱水率能达到 1.804 kg/（m^2·d），同时杏干的高品质率可达85%。肖红伟等[23]在使用气体射流冲击干燥杏的试验中观察到，干燥的温度和风速对其干燥速度都有明显的影响。王平[24]对鲜杏干燥过程的深入研究表明，如果先进行蒸汽热烫预处理，然后再进行干燥，与传统方法相比，时间可以大大缩短，约 45 h。与此同时，其干制品有更为出色的感官品质。张谦等[25]在杏子的 5HT-2 太阳能干燥中发现，干燥日平均水分损耗超过了单体的 5%，同时也大大缩短了干燥所需的时间。徐麟等[26]采用太阳能干燥装置进行杏果干燥，可获得优品率高达 83.30%的杏干制品，是自然晾晒优品率的 1.2 倍，但所需干燥时间长。杨瑞云等[27]通过使用热泵干燥小白杏，发现这种方法能比传统方法下干燥小白杏用时缩短 1~2d，而且干制品的感官品质更好。赵红霞等[28]以杏肉全粉为原料，采用微波干燥、热风干燥、微波真空干燥和微波对流干燥来进行物料的干燥处理，以杏肉全粉的营养价值、物理性质、感官品质和抗氧化特性为评价指标，得到以下结论：杏肉全粉中的总糖及还原糖能通过微波真空干燥和微波对流干燥的方法有效保留；物料的总酚及 VC 的损失率在微波对流干燥方法下最低，并且该方法下的产品感官评价得分最高。Topcam 等[29]研究了杏果在热空气辅助下的射频干燥工艺，建立了干燥温度对水分变化影响的数学模型，并进行了实验验证研究。在热空气辅助（50-60℃）下，射频干燥试验功率在 10 kW 交错穿过电极系统中进行，确定最佳电极间距为 81 mm，充电电极电势为 2500 V。并验证了该工艺的可行性，进行了工业干燥规模杏设计研究。Kim 等[30]以日本杏为原料制备的果汁粉末，探究其在不同浓度不可消化麦芽糊精（NMD）处理下的最佳喷雾干燥进风温度。得出结论：进气温度对水分含量、维生素 C 含量、色泽、抗氧化活性、pH 值和堆积密度有很大影响，而干制品产率和水溶性指数（WSI）仅受 NMD 浓度影响。其最佳喷雾干燥条件分别为 14.7%NMD 浓度和 154.5 ℃进风温度。在这些最佳条件下可以制备出具有理想理化性质的杏粉。Igual 等[31]对比分析了经热风干燥和微波干燥后，杏中有机酸、酚类化合物含量及抗氧化特性的区别影响。试验表明，采用微波能够对杏干生产工艺进行优化，但是，与热风干燥下的杏干相较，两者的抗氧化性无明显差别。

综上，国内外对杏果的干燥研究已有很多，但是采用真空冷冻干燥和微波真空干燥技术对杏果进行干燥的研究还鲜有报道。杏果中含有色素及许多对人体有益的热敏性营养成分，干制品中的热敏性营养成分保留率越高，色泽变化越小，其品质越好，所以，干燥时间和干燥温度对杏果干制品品质存在较大的影响。由此可见，采用以低温或真空干燥为主的干燥方法例如 FD 或 MVD，能提高杏干制品品质。此外，MVD 的干燥过程非常迅速，这在某种程度上可能会使小白杏在局部烧焦并硬化，从而影响其外观的质量。可以采用 FD 更好的保留其色素及营养成分，但是 FD 主要是以质量

传递控制为主，所以干燥耗时长，很难在保证干燥质量的前提下，提高干燥速率。

1.3 果蔬真空冷冻-微波真空联合干燥技术研究现状

真空冷冻干燥（Freeze Drying，FD）是在低温环境中利用水的凝固和升华原理完成的，在真空条件下将凝固的水分子从物料中去除，从而实现物料干燥[32]。其干燥过程一共分为预冻、升华干燥、解析干燥三个阶段。通过 FD 干制果蔬，对果蔬破坏率最低，干燥后果蔬产品色泽、营养物质以及感官品质均接近于新鲜果蔬，可满足高标准的生产要求[19]。黄忠闯等[33]采用不同的干燥方法对芒果的品质进行研究和分析，结果发现，对芒果进行真空冷冻干燥后，冻干产品能最大限度地保留 VC、总糖和蛋白质，组织变质程度较低，从而复水性也高于其他干燥方法；陈佳楠[34]研究了真空冷冻干燥菠萝片的干燥特性和品质，其可溶性固形物和抗坏血酸含量较鲜样略有降低，色泽较佳；Quispe 等[35]进行研究马基莓的不同干燥方法下的品质影响试验，结果显示，FD 能保留鲜样的 73%花翠素和 64%花青素，同其他方法相比，有含量最高的酚类化合物和抗氧化化合物，其干制品品质最佳，抗氧化能力最强。Wang 等[36]采用两种不同的干燥方法（真空冷冻干燥和热风干燥）对三个品种的桑葚进行干燥，并以各品种的鲜果作为对照，分析了不同干燥条件对桑葚物理特性、营养成分、功能成分和抗氧化活性的影响。得出结论，真空冷冻干燥后的桑葚干在润湿性、吸湿性和保水性等物理性质，可溶性蛋白质、抗坏血酸等营养成分，多酚、白藜芦醇、绿原酸和花青素等功能成分，以及抗氧化活性均优于热风干燥，更有利于保持桑葚的原有品质。由于加热过程能产生新物质，真空冷冻干燥作为一种非热技术的优势将得到展示。该干燥方法目前广泛应用于果蔬产品的脱水干燥，与其他干燥方式相比，冷冻干燥技术能最大程度保留食品原有营养成分，是高质量产品脱水的首选方式，但该技术的缺点在于干燥时间长，耗能大，成本高[37]。

微波真空干燥（Microwave Vacuum Drying MVD）是依赖于介电加热的基本原理，通过将高频电磁波传输至物料内部，以直接触发其内部水分子的活动，导致了水分子间的摩擦与碰撞，进而生热，最终实现了物料的水分释放，达到干燥的目的。因此，此方法的显著优势在于能在极短时间内完成干燥过程，同时还能对物质产生轻微的膨胀效应[38]。郭俊杰[39]对微波真空干燥、真空冷冻干燥、微波干燥和热风干燥这 4 种不同干燥技术对哈密杏品质影响的开展研究。通过比较各种干燥方法下产生的杏干样品，并对它们的营养成分（VC、可滴定酸）、复水性、咀嚼性和微观结构进行了深入分析。研究揭示了微波真空干燥在所有干燥手段中表现出卓越的性能；王亚娟等[40]发现 MVD 干燥胡萝卜片的干燥时间会随着微波功率密度的变化而变化。具体来说，当微波功率密度增加时，干燥时间会缩短，但同时也会导致干燥后的产品质量下降，

有极大概率出现焦糊现象。采用遗传算法来优化干燥过程中的各种参数，从而实现了干燥过程的有效控制，并显著提高了产品的质量和生产效率；Sigit 等[41]研究了烫漂预处理下的紫薯微波真空干燥动力学及品质，发现在微波功率为 450、600 和 850 W 下的微波真空干燥耗时为 6 至 12 min，远远小于热风干燥（600 min)；在微波真空干燥的紫薯干吸水指数和膨胀性均低于热风干燥，其的色泽、抗氧化活性和总酚含量也得到了有效提升。烫漂预处理对干紫薯干的品质的影响在热风干燥中更明显。综合考虑，MVD 技术具有较短的干燥时间和更快的干燥速度，但其缺点是干燥过程的均匀性不佳，特别是在接近干燥结束时，局部区域容易出现烧焦糊化的情况。

果蔬的联合干燥是将干燥过程分为多个干燥阶段，不同的干燥阶段采用不同的干燥方法，是一种果蔬组合干燥技术，以克服单一干燥方法的的局限性，提升干燥效率，确保干燥后的产品品质更上一层楼。例如微波真空干燥具有较高的干燥效率，但存在干燥时间过长，这可能会引发干燥物料在局部区域烧焦，从而导致干燥品质劣变[42]；真空冷冻干燥技术可以在很大程度上保留物料的原始颜色、香味、口感和形态，同时也能最大限度地保留食品的原始营养成分。然而，这种干燥方法需要较长的时间，能耗高，并且加工成本也相对较高[38]。因此，真空冷冻与微波真空联合干燥的干制产品综合了这两种方法的优势。该技术是一种新型的快速干燥方法，它通过将两种不同类型的设备结合使用，使干燥过程更加均匀，缩短干燥周期，减少能源消耗和生产成本，并能有效避免传统干燥中存在的不足。现阶段，联合干燥具有加速干燥进程、降低干燥能耗、提高干燥品质的优势，已成为国内外研究热点。

真空冷冻-微波真空联合干燥（Freeze-Microwave vacuum drying，FD-MVD）是将 FD 与 MVD 进行分段组合，是一种低温快速干燥的方法，可使两种干燥方式优势互补。当物料在 FD 方法中达到某一干燥水平后，再采用 MVD 方法进一步干燥，直至达到预设的含水率。使 MVD 阶段替代冗长的冻干解析干燥阶段，在保证果蔬干燥品质的同时缩短干燥时间，降低能耗。

关于 FD-MVD 方面国内外专家学者有如下研究：邢晓凡等[43]以黄桃为研究对象，采用了真空冷冻干燥（FD）、真空冷冻-微波真空联合干燥（FM）、微波真空-真空冷冻联合干燥（MF）、真空冷冻-热风联合干燥（FH）及热风-真空冷冻联合干燥（HF），研究 5 种干燥方法对黄桃果干感官品质、微观结构及营养物质含量的影响，确定最优干燥方法为 FD-MVD，既能提高产品质量，又能减少干燥时间，是一种比较理想的干制方法；肖曼玉[44]等研究了微波-真空冷冻联合干燥、微波干燥、真空冷冻干燥对青椒干燥品质的影响，结果表明 FD-MVD 和 FD 的青椒产品在质构、青椒组织微观结构、部分理化指标方面均优于 MVD 的青椒产品，联合干燥不仅能很好的保留原料营养成分，还能大大缩短干燥时间，减少能源消耗；黄略略等[45]比较了铁棍山药在真空冷冻干燥（FD）、微波真空干燥（MVD）、真空冷冻-微波真空联合干

燥（FD -MVD）、热风干燥（AD）4 种不同的干燥方式下的品质区别，得出 FD 和联合干燥产品都能很好地保留营养物质含量，联合干燥产品色泽稍差于 FD 产品；超微结构的结果表明，FD 和 FD-MVD 都能够很好的保持怀山药的细胞结构，从微观角度证实了两种干燥方法的产品都具有较高的品质，但联合干燥却可以减少近 31％的干燥时间，与冻干相比，联合干燥可以实现节能保质的目的；Jiang[46]等研制功能性秋葵零食，采用 AD、FD、MVD、FD-MVD 和 AD-MVD 这几种不同干燥方式进行加工，对比其品质差异，研究结果揭示，FD-MVD 作为一种功能性秋葵零食的加工方法，具有巨大的发展潜力。

国内外的研究都已认同，FD-MVD 可以有效缩短干燥时间的基础上，极大程度保证干燥品质，并且降低能耗。目前，真空冷冻-微波真空联合干燥技术主要应用于制作苹果、黄桃、山药、香菇、秋葵等果蔬脆片，然而，将杏果联合干燥以制作休闲脆片的相关工艺报道却相对较少。

1.4 研究内容及技术路线

1.4.1 研究目标

为探索寻找最佳干燥小白杏的技术途径，根据小白杏干制加工技术及真空冷冻-微波真空联合干燥（FD-MVD）的国内外研究现状，将 FD-MVD 方法应用于小白杏的干制加工，分析其干燥特性，计算有效水分扩散系数及其干燥活化能，优化小白杏 FD-MVD 工艺参数，并建立小白杏联合干燥水分比曲线模型，最后与单一干燥方法的杏干制品进行对比，验证明确了 FD-MVD 的优越性，为小白杏干制加工的品质提升、效益增强，提供一种新的联合干燥技术和理论依据。

1.4.2 研究内容

1.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥特性研究

通过对小白杏 FD-MVD 不同干燥条件下的干燥特性、干燥动力学、水分有效扩散系数及干燥活化能等方面进行研究，阐明不同干燥条件对小白杏干燥特性与干燥动力学之间的相关性，为进一步优化小白杏干燥过程奠定基础。

2.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥动力学模型研究

选取 12 种果蔬常用干燥模型对小白杏 FD-MVD 干燥过程中的水分变化进行描述，以确定最佳描述干燥过程的模型，并通过试验验证。

3.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥工艺优化研究

以小白杏 FD-MVD 单因素试验为基础，选择转换点含水率、微波温度及微波功率为影响因素，以干燥时间、色泽、维生素 C 含量为评价指标，并采取响应曲面分析法对小白杏 FD-MVD 干燥工艺条件进行优化，确定最佳工艺参数，并对其进行实验验证。

4.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥品质研究

将优化后，获得较好的工艺参数下 FD-MVD 干燥的小白杏，与传统果蔬单一干燥方法（热风干燥、红外干燥、真空冷冻干燥、微波真空干燥）下的小白杏干制品进行品质比较，分析各干燥方法下色泽、复水性、质构及维生素 C、可滴定酸含量，来验证联合干燥的干燥效果优于其他干燥方法。

1.4.3 研究方法

1.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥单因素试验

通过对不同转换点含水率、微波温度和微波功率的条件下小白杏 FD-MVD 干燥过程中的水分比和干燥速率分析，研究干燥时间、干基含水率及水分有效扩散系数的变化趋势，有助于以物质传递的角度去揭示不同干燥条件对小白杏 FD-MVD 过程的影响，并计算出干燥过程中的干燥活化能。

2.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥动力学模型研究

结合 12 种广泛应用于果蔬干燥的经典干燥数学模型，通过 Matlab 软件进行拟合不同条件下的小白杏联合干燥过程中的水分比曲线，从而得出最适宜的小白杏干燥模型，以期为小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥过程提供相应的理论依据。

3.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥工艺优化

利用 Box-Behnken 中心组合设计优化工艺参数，进行单因素试验确定影响因素的水平，研究不同转换点含水率、微波温度和微波功率，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，同时对该参数下的联合干燥与最适宜的干燥模型进行拟合和验证，得到小白杏真联合干燥的最佳干燥模型。

4.小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥品质分析

通过优化得到的 FD-MVD 最佳工艺参数，在相同的试验条件下，对小白杏进行了联合干燥和单一干燥试验。研究对比了联合干燥与果蔬的常规单一干燥方法对小白杏的干燥品质（色差值、复水特性、维生素 C 含量、可滴定酸含量及微观结构）的影响，来验证联合干燥的优势和可行性，以期实现小白杏联合干燥的提质增效，对推动小白杏深加工技术升级，实现规模化、标准化生产，为小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的中试加工工艺优化及下游产品的开发提供相关的理论依据。

1.4.4 技术路线

本文研究技术路线见图 1-1：

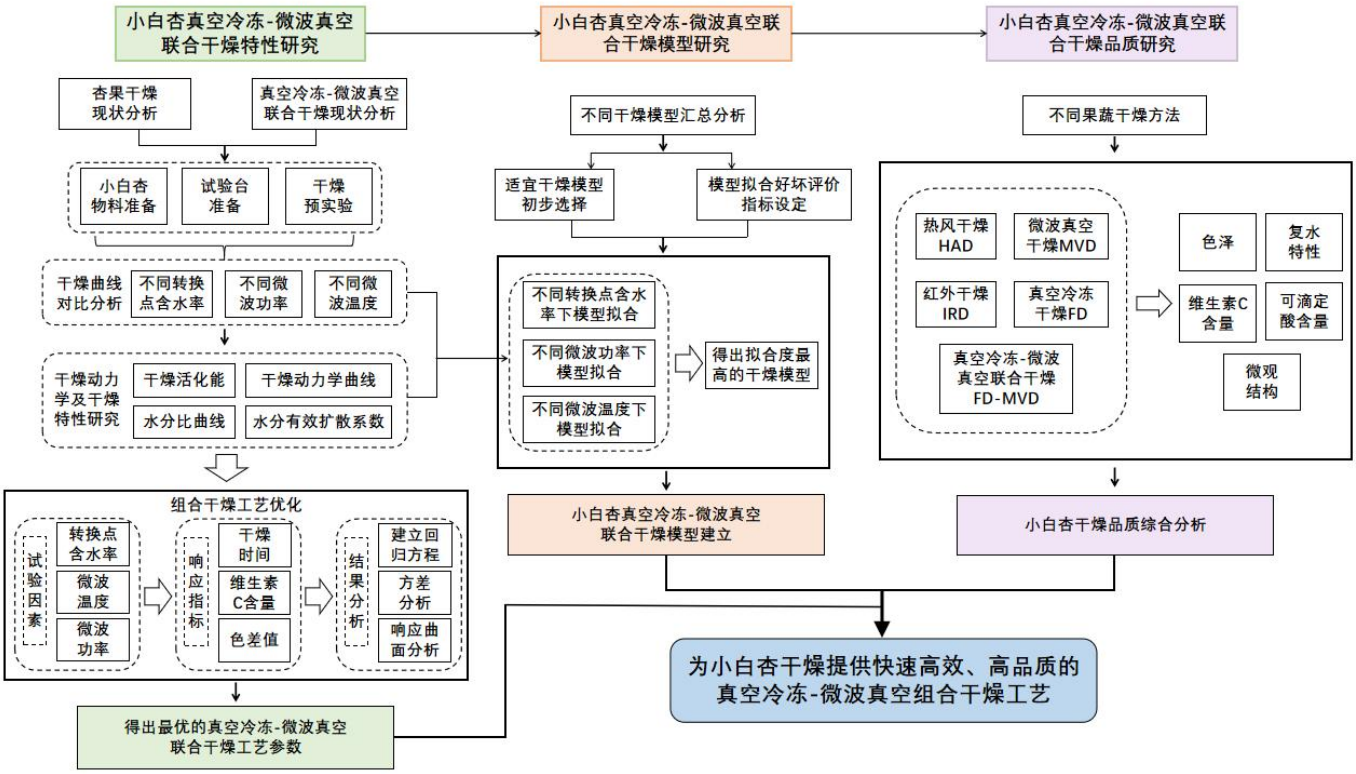


图 1-1 技术路线图

Fig. 1-1 Technical route

1.5 本章小结

本章通过分析探讨国内外果蔬真空冷冻-微波真空联合干燥技术，介绍了杏果干燥研究的技术现状。以解决目前小白杏干燥耗时较长、内部结构受损严重、外观差、营养成分流失较多及风味欠佳等问题，通过这种联合干燥方法为小白杏实际的干燥加工以及生产应用提供了一种全新的工艺方法和理论支持。最后，详细阐述了该研究的研究目标、研究内容、研究方法及技术路线。

第 2 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥特性研究

真空冷冻干燥（Freeze Drying，FD）是将新鲜材料提前冷冻，并采用水冷冻升华的原理，将冷冻材料中的水分由固体直接升华成气体，从而达到干燥目的，故能较好的保持食品原来的结构，从而最大限度地保留食品的原始颜色和营养成分，然而干燥速率缓慢、单位耗能量大、经济应用性不高[19，33，44]。微波真空干燥技术（Microwave Vacuum Drying，MVD）成功将微波干燥与真空干燥的各自优势相结合。通过微波作为热源，在真空条件下直接加热物料内部进行干燥。在真空负压的环境中，水分蒸发的温度较低，有助于加快干燥过程[47]。但同时，如果直接采用微波真空干燥，可能会容易导致焦糊、皱缩和变色等问题，从而导致营养成分的损失率增加，降低风味口感。为了克服真空冷冻干燥和微波真空干燥过程中遇到的难题，采用联合干燥技术：真空冷冻-微波真空联合干燥应用于小白杏的干燥过程中，联合干燥对于小白杏来说是一种新型加工方式，经过对黄桃[43]、青椒[44]、铁棍山药[48]等物料的深入研究，发现这是一种能够提高干燥质量和效果的联合干燥方法，但关于杏果的 FD-MVD 的研究尚未有相关报道。为了进一步了解其在食品中应用价值和开发前景，本文首先将杏果内部的大量自由水分采用真空冷冻干燥的技术去除，接着剩余的自由水和部分半结合水通过微波真空干燥方法来去除，其目的是为了减少干燥所需的时间，降低颜色的劣化，并提升干燥的品质。

本章基于小白杏 FD-MVD，分别对不同干燥条件（转换点含水率、微波功率和微波时间）下的干燥特性变化进行深入探讨分析。通过详细的计算，研究小白杏在 FD-MVD 过程中水分有效扩散系数与转换点含水率、微波功率和微波温度之间的相关性及变化规律。在试验数据的基础上，计算出小白杏 FD-MVD 的干燥活化能，为后续进一步地优化 FD-MVD 工艺，改善提升干制品品质予以稳固可靠的理论支撑。

2.1 材料与方法

2.1.1 试验材料

采购产自新疆库车市的小白杏如图 2-1 所示，单果平均重量为 15.86±1.25g，果实纵径 28.25±0.16mm，果实横径 27.68±0.48mm，果实侧径 26.93±0.47mm，市售，挑选熟度一致，大小相近，无机械损伤和病虫害的新鲜小白杏，初始含水率为 81.82±0.75%（参考 GB5009.3－2016 中的直接干燥法进行测定）[49]，放置保鲜箱带回

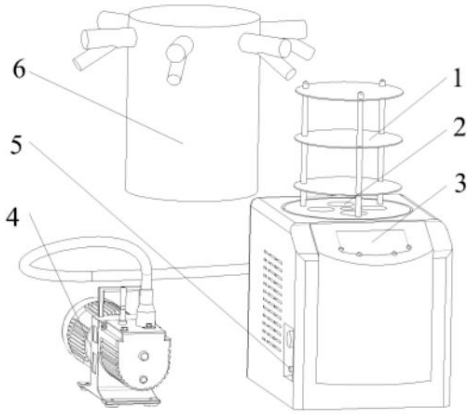
实验室，置于 4℃ 冰箱中贮藏备用。每次试验时称(100±1) g 小白杏，在干基含水率达到 10%的状态后停止干燥[40]。重复试验为 3 次，取结果的平均值进行分析[39]。



图 2-1 新疆库车小白杏
Fig.2-1 Kuqa,Xinjiang small white apricot

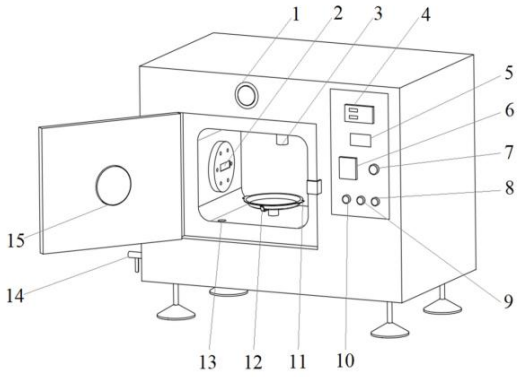
2.1.2 仪器设备

Christ Alpha 1－2Ldplus 实验室真空冷冻干燥机（德国 Christ 真空冷冻干燥机有限公司）；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）；BSM－4220.4 电子天平（上海卓精电子科技有限公司，精确度 0.0001g ）。



1.置物盘；2.冷阱；3.控制屏面板；4.真空泵；
5.排湿口；6.冷凝室

图 2-2 冷冻干燥机
Fig.2-2 Freeze dryer



1.真空表；2.微波发生器；3.红外测温仪；4.控温仪表；
5.功率显示屏；6.定时器；7.功率调节旋钮；8.微波开关；
9.真空开关；10.电源开关；11.料盘；12.不锈钢支架；
13.排气孔；14.排气阀；15.观察窗

图 2-3 微波真空干燥设备
Fig.2-3 Microwave vacuum dryer

2.1.3 试验方法

每次试验前，将小白杏从 4℃冰柜中取出恢复至室温，清水冲洗干净，挑选出形状颜色相似、果实饱满（平均重量 15.83±0.5g）的小白杏，洗好的小白杏用厨房纸去除表面多余的水，沿果缝切半，将果核取出，称取 100±1g，进行 FD-MVD 干燥，相关参数见表 2-1。

试验工艺流程：小白杏→挑选鲜果→冷藏(4℃冰柜，使水分分布均匀)→清洗→沥干→切分→去核→摆盘→干燥→冷却→真空装袋→成品→指标测定。

结合了前期预试验的较优结果并查阅参考相关文献[39, 48, 50]来制定试验方案参数，详细参数见表 2-1。明确了 FD-MVD 的影响因素，即转换点含水率、微波功率、微波温度。其中，转换点含水率范围设定在 45%~65%，这是因为在含水率过低时，会对感官品质有负面影响，如果含水率过高，小白杏的汁液会溢出；微波功率范围为 300 W ~ 700 W，这是因为微波功率过低会延长干燥时间并增加能耗，而微波功率太高则可能在物料干燥时产生焦糊现象；微波温度的范围是 40℃~60℃，当微波温度太低会导致干燥周期延长，如果微波温度太高，就容易出现过度干燥和焦糊的情况。

表 2-1 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥试验方案

Table 2-1 Experimental scheme of FD-MVD of Small white apricot

冷冻干燥温度	真空度	含水率转换点（%）	微波功率（W）	微波温度（℃）
-40℃	12 Pa	45、50、55、60、65	500	50
		55	300、400、500、600、700	50
		55	500	40、50、60

2.1.4 试验参数测定

1.干基含水率

干燥过程中小白杏含水率计算公式如下[47]

$$M_{\mathrm{t}}=\frac{G_t-G_d}{G_d} \tag{2-1}$$

式中：M_t为任意干燥 t 时刻的干基含水率，%；G_t为任意干燥 t 时刻小白杏的质量，g；G_d为小白杏干物质质量，g。

2.水分比

在干燥过程中，小白杏中的水含量用水分比（MR, moisture ratio）来表示，计算公式如下[47]

$$MR=\frac{M_t-M_e}{M_0-M_e} \tag{2-2}$$

式中：M_0，M_e和 M_t分别为小白杏初始、平衡时和任意干燥 t 时刻的干基含水率，%。

因为小白杏的平衡含水率 M_e远小于 M_0和 M_t，可近似为 0，所以公式可简化为[47]

$$MR=\frac{M_t}{M_0} \tag{2-3}$$

3. 干燥速率

干燥速率（drying rate，*DR*）：描述物料的脱水速率的快慢。小白杏干燥过程中的速率可由式（2-4）求得[47]。

$$DR=\frac{M_t-M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \tag{2-4}$$

式中：*DR* 表示干燥速率，g/(g·h)；M_t 表示 *t* 时刻的小白杏干基含水率，$M_{t+\Delta t}$ 表示（*t*+*Δt*）时刻的小白杏干基含水率，g/g；*t* 为时间，h。

4.水分有效扩散系数计算

水分有效扩散系数 D_{eff} 是表示水分在物料内部整体扩散能力大小的参数。通过计算和分析不同干燥条件下物料的有效水分扩散系数 D_{eff}，能够把握干燥过程的变化规律，优化干燥工艺和方法，提高干燥效率，保证干燥产品的品质。水分有效扩散系数可由 Fick 第二扩撒定律来描述[51]，对半切开的半球体杏果可用体积等效的球体来近似。由 Fick 方程可知，球体有效水分扩散系数表示见公式（2-5）[13]：

$$\ln MR=\ln\frac{6}{\pi^2}-(\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}t) \tag{2-5}$$

式中 D_{eff} 为干燥过程中小白杏的水分有效扩散系数，m^2/s；t 为小白杏的干燥时间，s；r 为小白杏的等效半径，m。r 的计算方法见公式（2-6）[13]：

$$r=\frac{(LWS)^{\frac{1}{3}}}{r^2}t \tag{2-6}$$

式中：L 为杏果长轴，m；W 为杏果中轴，m；S 为杏果短轴，m。

两边取自然对数得到公式（2-7）。

$$\ln MR=\ln\frac{6}{\pi^2}-\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}t \tag{2-7}$$

5.干燥活化能

干燥活化能表示干燥过程中每去除一摩尔水分需要多少能量，数值越高，干燥需要的能量越多[52]。在干燥过程中，水分的有效扩散系数 D_{eff} 与微波功率和载物量之间的函数关系是通过阿伦尼乌斯方程（Arrhenius equation）来进行描述的，见式（2-8）[53]。

$$D_{eff}=D_0\cdot\exp(-\frac{m\cdot E_a}{P_W}) \tag{2-8}$$

式中：D_{eff}水分有效扩散系数，m^2/s；D_0为扩散基数，m^2/s；E_a为干燥活化能，W/g；m为物料转入微波真空干燥时的重量，g；P_W为微波功率，W。

将式（2-8）两边取对数，得到式（2-9）。

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - (\frac{m \cdot E_a}{P_W}) \tag{2-9}$$

由式（2-9）可知，$\ln D_{eff}$与 m/P_W呈线性关系，因此可对 $\ln D_{eff}$与 m/P_W进行线性拟合，以求得 Ea 值。

2.1.5 统计分析方法

数据统计分析采用 SPSS 27.0 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 2022 软件。

2.2 结果与讨论

2.2.1 不同转换点含水率对小白杏 FD-MVD 干燥特性的影响

（1）不同转换点含水率对水分比的影响

图 2-4 展示了小白杏的水分比受不同的转换点含水率的影响。在 FD-MVD 的过程中，微波功率设定在 500W、微波温度设定在 50℃，将小白杏在真空冷冻干燥机中干燥至湿基含水率分别为 65%、60%、55%、50%和 45%，接着将其转移到微波真空干燥机进行下一步的干燥。小白杏的干燥特性受水分转移点的影响很大，从该图可以看出，随着转变点含水率的减小，小白杏干达到规定含水量的时间延长。FD 阶段干燥时间分别为 3.5、4.5、5.4、6.4 和 7.1h，MVD 阶段干燥时间分别为 0.17、0.13、0.12、0.1 和 0.08 h。随着转换点含水率的降低，MVD 的干燥时间缩短，而总体干燥时间延长。这主要是由于 FD 过程中游离水被排出，造成了小白杏内部结构和表层孔隙的变化，有利于后期 MVD 过程中水分的传输，进而减少干燥时间。

如上所述，在小白杏的 FD-MVD 过程中，转换点含水率越高，所需的干燥时间就越短，干燥时间主要是由 FD 阶段决定的。因此，在实际生产中可通过提高转换点含水率来缩短干燥时间。当转换点的含水率从 45%上升到 65%时，干燥所需的时间从 7.1h 缩短到了 3.5h。另外，在干燥的初始阶段，水分比的下降速度相对较快，但随着干燥过程的深入，这一下降速度逐步放缓。

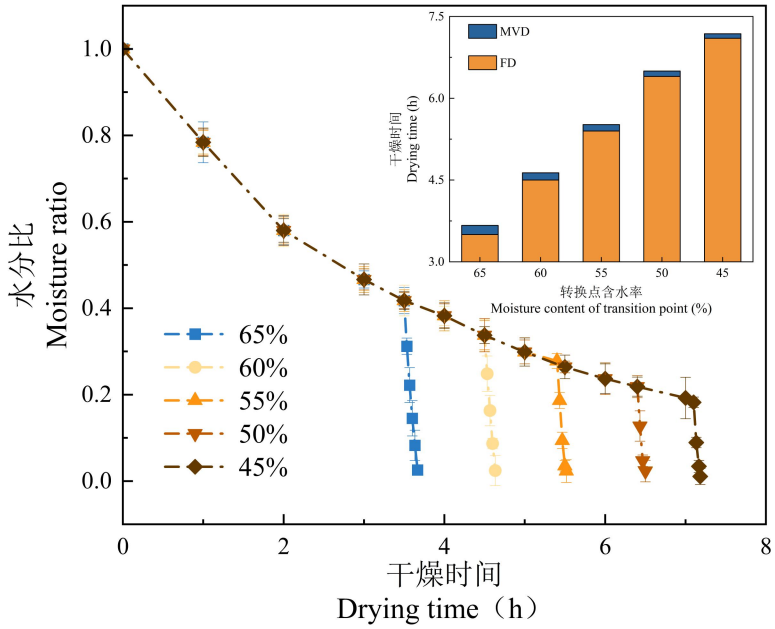


图 2-4 不同转换点含水率下的小白杏水分比曲线

Fig.2-4 Moisture ratio curves of small white apricot with different converted moisture content

（2）不同转换点含水率对干燥速率的影响

图 2-5 为以不同转换点含水率为条件下的小白杏的 FD-MVD 过程中，其干燥速度的曲线。由图可知，FD 干燥阶段及 MVD 干燥阶段都是降速干燥，并且干燥速度随干基水含率的减少而减缓；而 MVD 加热效率高，小白杏处于偏低含水率时，会导致水分的迁移，使得后续的干燥速率显著加速。在 FD 初始阶段，其干燥速率最快，达到 0.1465 g/(g·h)，但随着干基含水率的减少，干燥速率逐渐减缓；FD 阶段开始时水分含量下降速度较高，这是因为在工艺开始时，传热传质阻力较小，小白杏进入了快速失水的阶段，这使得干燥速率较高，但随着 FD 保持时间逐渐增长，物料的含水率开始降低，这意味着需要更多的能量来去除水分，从而使得干燥速率逐渐下降[54]，在达到特定的含水率（65%、60%、55%、50%、45%）时，干燥方法更换为 MVD，在此阶段，干燥速度突然增加了 5~10 倍，分别从 0.0440 g/(g·h)、0.0404 g/(g·h)、0.0236 g/(g·h)、0.0207 g/(g·h)、0.0197 g/(g·h)提升至 1.4403 g/(g·h)、1.2159 g/(g·h)、1.2456 g/(g·h)、1.2440 g/(g·h)、1.2704 g/(g·h)。在此之后，随着小白杏干基含水率的减少，干燥速率明显减慢。这主要由于在 MVD 初始阶段，小白杏的内部含有较高的水分，这使得物料能更好地吸收微波能量，就会产生更多的热能，从而使得干燥速率变得更大[55]。此外，随之物料的湿基含水率愈加增高时，因受热而引起的内部水分蒸发也愈加剧烈，使得小白杏内部所承受的压力相应地增加。在干燥的过程中，汁液更有可能溢出，这有助于提高干燥的效率。随着 MVD 的进行，由于物料含水量的降低，其对微波能的吸收能力也愈加降低，从而使其干燥速度的减缓，但在 MVD 的后

期阶段，其干燥速度仍然超过了 FD 阶段。这表明 MVD 的应用能够有效地解决小白杏在真空干燥后期干燥过程中速度缓慢的问题。

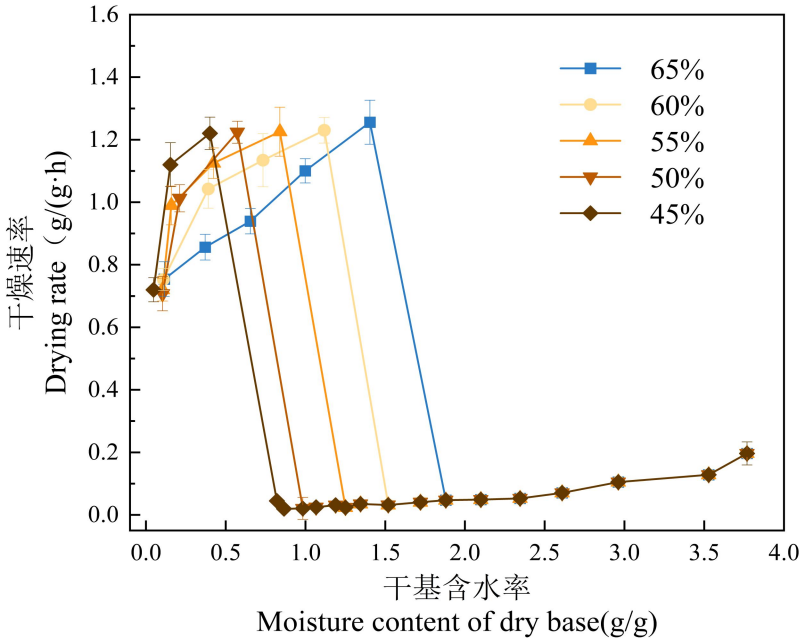


图 2-5 不同转换点含水率下的小白杏干燥速率曲线

Fig.2-5 Drying rate curve of small white apricot with different converted moisture content

（3）不同转换点含水率对水分有效扩散系数的影响

水分的有效扩散系数是衡量物料在干燥过程中水分传输速度重要指标，能够表达物料的水分比传质性能，D_{eff}值越大，意味着有更快的干燥速率[56,57]。图 2-4 可知，小白杏 FD 与 MVD 的干燥过程均为降速干燥，符合 Fick 第二定律，并用其来计算不同转换点含水率影响下的水分有效扩散系数。表 2-2 所示为通过线性回归分析得出的水分有效扩散系数。在 FD 干燥过程中，跟由转换点含水率的降低，D_{eff}值也会相应地逐渐减少，在转换点含水率从 65%减小到 45%时，D_{eff}也从 $2.52\times10^{-9}m^2/s$ 降到 $2.28\times10^{-9}m^2/s$；在 MVD 阶段，转换点含水率降低时，D_{eff}表达出先增大后减小的变化状态，其值范围在 1.83×10^{-7}~$2.59\times10^{-7}m^2/s$ 之间。

表 2-2 不同转换点含水率下的水分有效扩散系数

Table 2-2 The effective diffusion coefficient of water under different converted moisture content

转换点含水率	FD 阶段（冷冻温度-40℃）			MVD 阶段（微波功率 500W，微波温度 50℃）		
	线性方程	R^2	D_{eff}	线性方程	R^2	D_{eff}
65%	$\ln MR=-6.87\times10^{-5}t-0.02618$	0.9941	2.52×10^{-9}	$\ln MR=-4.99\times10^{-3}t+62.471$	0.9328	1.83×10^{-7}
60%	$\ln MR=-6.46\times10^{-5}t-0.05012$	0.9977	2.41×10^{-9}	$\ln MR=-6.34\times10^{-3}t+82.763$	0.9350	2.33×10^{-7}
55%	$\ln MR=-6.47\times10^{-5}t-0.04498$	0.9959	2.38×10^{-9}	$\ln MR=-7.04\times10^{-3}t+136.001$	0.9897	2.59×10^{-7}
50%	$\ln MR=-6.48\times10^{-5}t-0.04552$	0.9976	2.37×10^{-9}	$\ln MR=-7.07\times10^{-3}t+147.127$	0.9842	2.58×10^{-7}
45%	$\ln MR=-6.23\times10^{-5}t-0.04783$	0.9978	2.28×10^{-9}	$\ln MR=-11.23\times10^{-3}t+208.84$	0.9335	2.12×10^{-7}

2.2.2 不同微波功率对小白杏 FD-MVD 干燥特性的影响

（1）不同微波功率对水分比的影响

图 2-6 展示了不同的微波功率对小白杏水分比的影响。首先在真空冷冻干燥机里对小白杏进行干燥，在湿基含水率达到 55%时，转换为微波真空干燥，并分别设置微波功率为 300、400、500、600 和 700W，固定微波温度在 50℃。即图可见，MVD 阶段微波功率的大小对小白杏的干燥特性产生显著影响：微波功率越大，其水分比下降速率越快，而干燥所需的时间也就越短。这种现象的出现是由于微波功率的提升导致了小白杏内部分子发生振动，使小白杏单位时间吸收的微波能增多，将动能转换为热能，物料内部的温度升高，加速了水分扩散蒸发；微波功率越大，干燥时内部能量转换过程增强，提高了物料的温度，物质的内部水分传递速度变得越快，从而加速了水分蒸发[39]。微波功率在 300、400、500、600 和 700W 时，小白杏的水分达到预定含水量所使用的时间分别 14、10、7、6 和 5min。水分比的下降速率是最缓慢的微波功率条件为 300W，其干燥耗时最长，为 5.63h；水分比下降速率最快速的微波功率条件为 700W，其干燥耗时最短（5.48h），相较于 300W 时，其干燥时间缩短了 58.33%。此外，试验过程中发现，当微波功率过高到一定程度时，小白杏的汁液会有更多的溢出，这可能会导致物料焦糊。所以，选择合适的微波功率，既可以缩短 MVD 期所需要的干燥时间，又可以确保干燥后的成品质量。

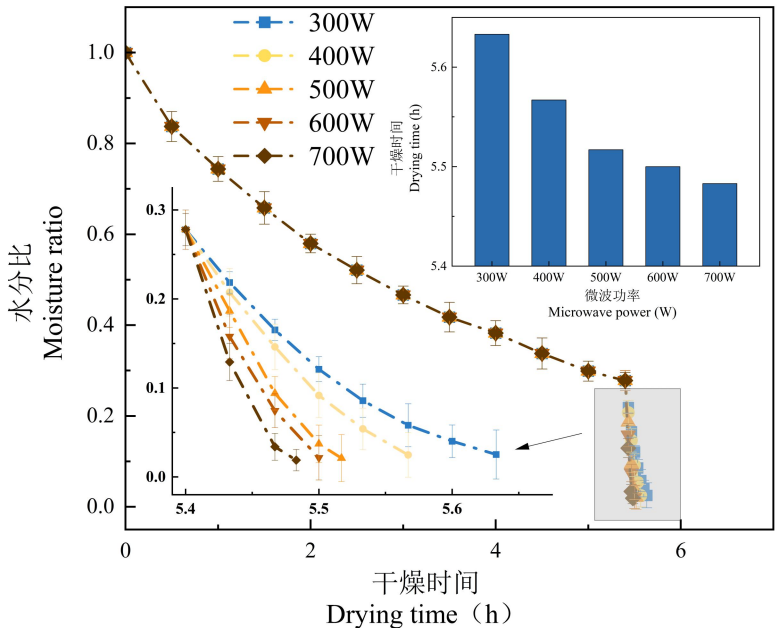


图 2-6 不同微波功率下的小白杏水分比曲线

Fig.2-6 Moisture ratio of small white apricot with different microwave power

（2）不同微波功率对干燥速率的影响

在不同的微波功率条件下，小白杏 FD-MVD 的干燥速率曲线即图 2-7。如图所示，

随着干燥时间的增加，物料水分含量降低，FD 与 MVD 阶段均为降速干燥。同时，可以看出在 MVD 阶段，微波功率对干燥速率有显著影响，随着微波功率的增加，干燥速率也随之增大，且微波功率越大，干燥曲线越陡，干基含水率下降速度越快，耗时越短。这个结果和目前很多其它物料的微波干燥所得到的结论相吻合，如胡萝卜[40]、猕猴桃[58]等。研究结果显示，在 300W 的微波功率下，小白杏的干燥速率下降趋势减缓，在 MVD 初始点的干燥速率最小（0.81 g/(g·h)）；在微波功率达到 700 W 时，干燥速率下降趋势较快，MVD 初始点的干燥速率最大（2.03 g/(g·h)），这几乎是在 300W 功率下的三倍之多。随着微波功率逐渐增大，物料获得了更多的能量，这使得单位时间内能够吸收更多的热量，从而加快了物料中水分的蒸发速度，进一步加速了小白杏的干燥过程[59]。

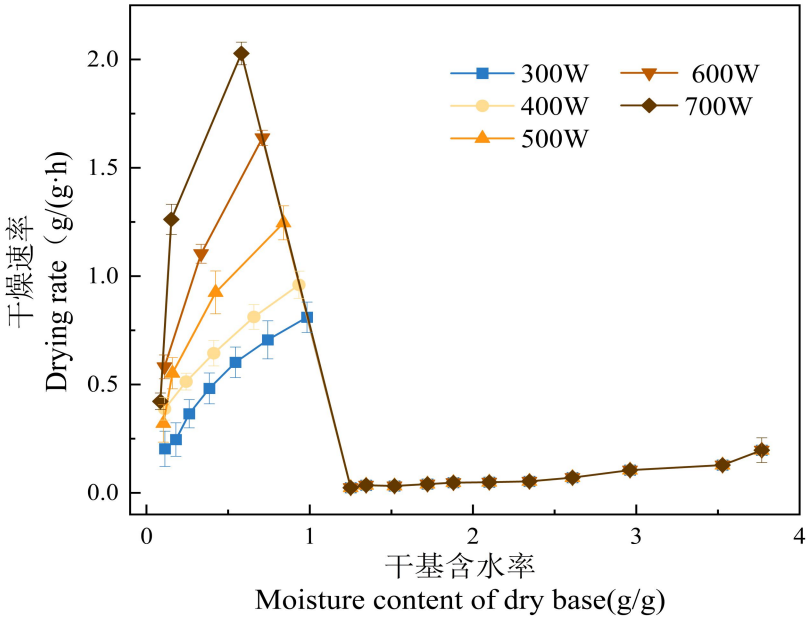


图 2-7 不同微波功率下的小白杏干燥速率曲线

Fig.2-7 Drying rate curve of small white apricot with different microwave power

（3）不同微波功率对水分有效扩散系数的影响

表 2-3 给出了水分有效扩散系数在不同微波功率下的详细信息。在 MVD 干燥过程中，转换点含水率固定在 55%、微波温度固定在 50℃，改变微波功率，即从 300W 上升到 700W，小白杏的水分有效扩散系数也随着微波功率的增加而逐渐增加，其值由 $1.92\times10^{-7}m^2/s$ 增至 $3.93\times10^{-7}m^2/s$，通过提升微波功率，能够发现可以显著增加小白杏在联合干燥过程后一阶段的水分有效扩散系数。这个结果与余虹露[60]研究百合微波真空干燥的成果相呼应，当微波功率增强时，物料的微波真空干燥过程中水分有效扩散速度会随之上升。同样地，小白杏的水分有效扩散速度也因微波功率的提升而加速。

表 2-3 不同微波功率下的水分有效扩散系数

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

FD阶段（冷冻温度－40℃，转换点含水率55% ）			MVD阶段（转换点含水率55% ，微波温度50 ℃）			
线性方程	R^2	D_{eff}	微波功率	线性方程	R^2	D_{eff}
			300W	ln*MR*=-7.97×10^{-3}t+147.042	0.9921	1.92×10^{-7}
			400W	ln*MR*=-4.37×10^{-3}t+84.005	0.9777	2.41×10^{-7}
ln*MR*=-6.47×10^{-5}t-0.04498	0.9959	2.38×10^{-9}	500W	ln*MR*=-7.04×10^{-3}t+136.001	0.9897	2.59×10^{-7}
			600W	ln*MR*=-7.70×10^{-3}t+130.873	0.9857	2.83×10^{-7}
			700W	ln*MR*=-10.72×10^{-3}t+201.845	0.9994	3.93×10^{-7}

（3）不同微波功率对活化能的影响

图 2-8 所展现了干燥过程的活化能，其可由不同微波功率下的 lnD_{eff}和载物量及微波功率的比值的关系式得出。通过式（2-9）及下图中的线性拟合公式联合计算得出 D_0 的值为 5.1893×10^{-7}m^2/s，E_a 的值为 7.40 W/g，这表明在小白杏 FD-MVD 过程中经过 FD 至湿基含水率 55%后，在将物料转移到微波真空干燥设备进行处理的过程中的平均活化能数值为 7.40W/g。这一发现与近期的研究结果以及其他相关领域的报告相吻合。例如，对于沙棘[47]的微波真空干燥过程，平均活化能的数值是 17.07W/g；苹果片[61]在微波干燥过程中，其平均活化能是 12.15W/g；经过微波干燥处理后的熟化紫薯片[62]，其平均活化能为 4.89W/g。综合而言，小白杏、沙棘、苹果等水果与紫薯等蔬菜相比，含有更多的糖分与果胶物质，而糖分和果胶对水分具有强烈的吸附能力，因此这类物料的干燥活化能较大，比较不易干燥[23]。

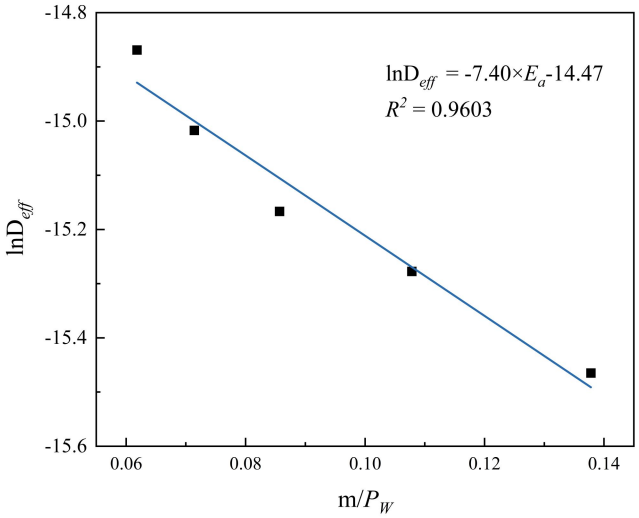


图 2-8 微波功率倒数与水分有效扩散系数关系曲线

Fig.2-8 Relationship between reciprocal microwave power and effective diffusion coefficient of water

2.2.3 不同微波温度对小白杏 FD-MVD 干燥特性的影响

（1）不同微波温度对水分比的影响

图 2-9 展示了不同的微波温度对小白杏水分比的影响。首先在真空冷冻干燥机里对小白杏进行干燥，直到其湿基含水率达到 55%，然后在微波真空干燥机中进行下一步的微波真空干燥，将微波温度设置为 40、50 和 60℃，微波功率为 500 W 保持不变。从图可得，在不同的干燥温度下，所需的干燥时间存在显著的差别，即随着干燥温度的提高，所需要的干燥时间缩短，而干燥效率则有所提高，干燥速率随着水分含量的减少而减少。小白杏不同温度的微波真空干燥属于降速干燥，在干燥过程中，水分蒸发的界面随着干燥时间延长，不断向物料内部迁移，进而水分迁移距离持续增加，同时，干燥界面两侧的温度和湿度差逐渐减小，使干燥速率不断降低[63]。随着 MVD 干燥过程中的温度上升，物料内的水分子活动变得更加活跃，从而使得水分吸收更多的能量并增强其流动性，提升了小白杏的传热传质效率[64]。在微波温度设定为 40℃时，MVD 阶段的干燥时间由于其水分比下降速率最为缓慢而变长，用时 9min；在微波温度设定为 60℃时，MVD 阶段的干燥时间由于其水分比下降速率显著加快，也随之减少，用时 6min；相较于 40℃时的干燥时间，这个缩短的比例达到了 33.33%。但在试验过程中发现，尽管随着温度的提高，干燥时间缩短，但是易引起褐变，风味变差。综合看来，需选择适宜的温度在提高干燥效率的同时保证干燥品质。

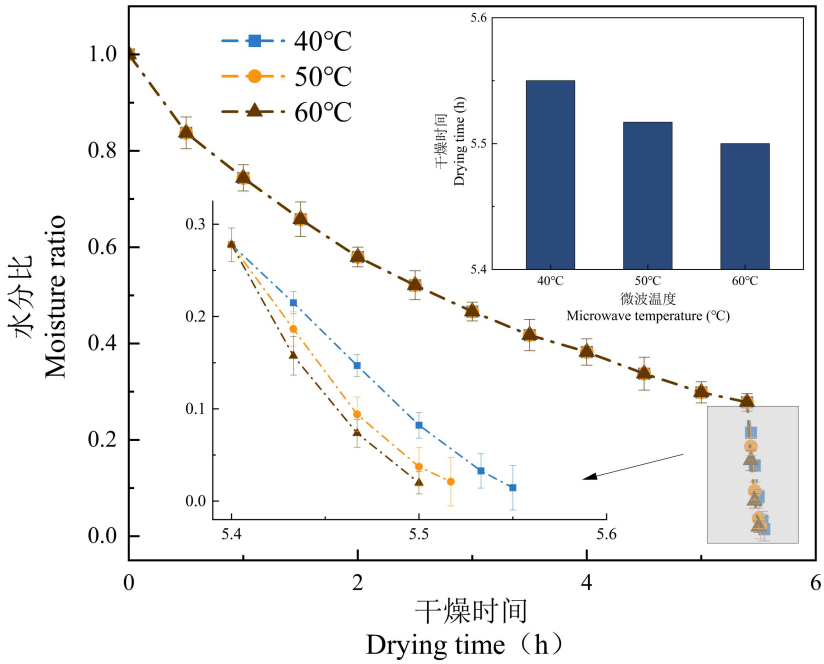


图 2-9 不同微波温度下的小白杏水分比曲线

Fig.2-9 Moisture ratio of small white apricot with different microwave temperature

（2）不同微波温度对干燥速率的影响

图 2-10 所示为不同微波温度下的小白杏干燥速率的变化。由图可知，在 FD 初期，小白杏水分含量高，在脱水过程中，随游离水的大量升华，残余水份逐渐减少，干燥速度逐渐降低，进入 MVD 期后，物料温度急剧上升，水分的蒸发量又增大，干燥速率急剧提高。小白杏在 MVD 阶段的干燥速率于微波温度呈现正相关变化，当微波温度设置成 40℃时，干燥速率下降趋势缓慢，在 MVD 初始点的干燥速率最小，为 1.0345 g/(g·h)；当微波温度为 60℃时，干燥速率下降趋势最快，MVD 初始点的干燥速率最大，为 1.6416 g/(g·h)。在不同干燥温度环境下，小白杏的干燥速率存在显著差异，此现象在 MVD 干燥的初始阶段尤为突出。这可能与 MVD 干燥早期阶段的物料水分含量较高的状态有关。随着干燥温度的逐步升高，物料进入了快速的水分去除阶段；末期由于小白杏内部的水分含量下降时，其表面硬化的程度也会增加，这会进一步加大物质传输过程中的阻力，从而使得干燥速度减缓[65]。由于小白杏为热敏性物料，温度过高其热敏性营养成分会损失更严重，因此微波温度选择也不宜过高。

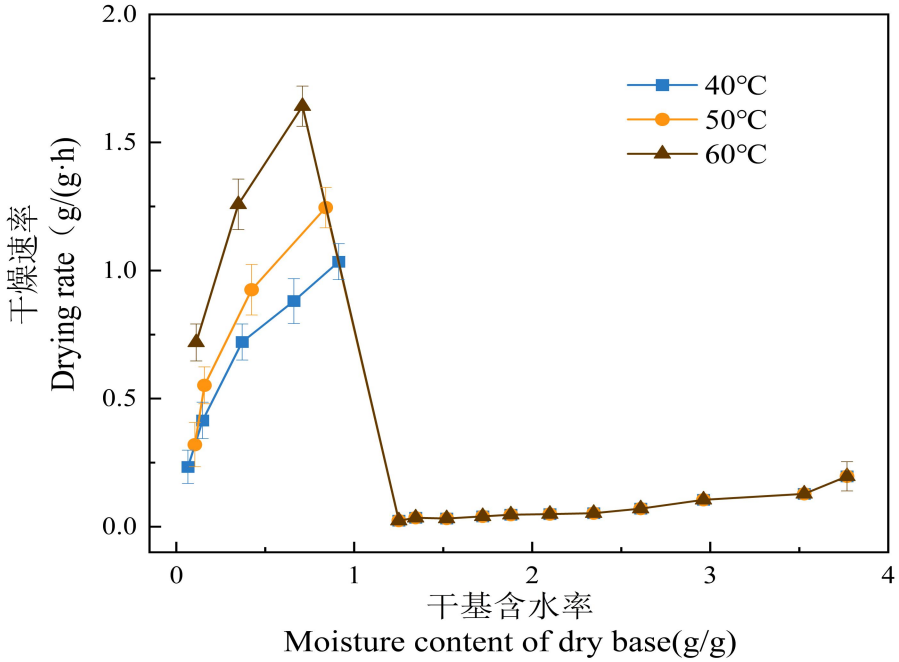


图 2-10 不同微波温度下的小白杏水分比曲线

Fig.2-10 Drying rate curve of Small white apricot with different microwave temperature

（3）不同微波温度对水分有效扩散系数的影响

表 2-4 所示为不同微波温度下小白杏水分比变化情况。在 MVD 干燥过程中，固定转换点含水率为 55%、微波功率为 500W。从表 2-4 中可以看出，水分有效扩散系数在 $2.32\times10^{-7}m^2/s$～$2.81\times10^{-7}m^2/s$ 之间变化，随着微波温度由 40℃增大至 60℃时，D_{eff}值也逐渐增加，这一结论与余虹露[60]在研究百合微波真空干燥时得出的结果类似。在高温条件下进行干燥时，较高的热能会增加小白杏水分子的活跃度，因而提高了小

白杏水分扩散率。

表 2-4 不同微波温度下的水分有效扩散系数

Table 2-4 The effective diffusion coefficient of water under different microwave temperature

FD阶段（冷冻温度 −40℃，转换点含水率55% ）			MVD阶段（转换点含水率55% ，微波功率500W ）			
线性方程	R^2	D_{eff}	微波功率	线性方程	R^2	D_{eff}
			40℃	$\ln MR$=-6.32×10^{-3}t+105.375	0.9480	2.32×10^{-7}
$\ln MR$=-6.47×10^{-5}t-0.04498	0.9959	2.38×10^{-9}	50℃	$\ln MR$=-7.04×10^{-3}t+136.001	0.9897	2.59×10^{-7}
			60℃	$\ln MR$=-7.65×10^{-3}t+126.271	0.9799	2.81×10^{-7}

2.3 本章小结

本章通过真空冷冻-微波真空联合干燥技术对小白杏进行干燥，研究了不同转换点含水率（45%、50%、55%、60%、65%）、微波功率（300、400、500、600、700W）和微波温度（40、50、60℃）下小白杏干燥特性，主要结论为：

（1）在不同转换点含水率条件下，随着转变点含水率的降低，延长了小白杏 FD-MVD 的干燥时间，FD 阶段对其有显著影响。当转换点含水率从 65%降低至 45%时，相应干燥时间从 3.67h 增长到 7.18h，其中在 FD 阶段所用时间分别是 3.50、7.10h，MVD 阶段耗时分别为 0.17、0.08h；FD 阶段的水分有效扩散系数随着转变点含水率的降低而降低，而 MVD 时的 D_{eff} 值随着转变点含水率的降低表达出增大后减小的趋势。

（2）在不同微波功率条件下，小白杏 FD-MVD 的干燥时间与微波功率呈现负相关。微波功率设置最低为 300W 时，微波真空干燥耗时最长为 14min；微波功率设置最高为 700W 时，微波真空干燥耗时最短为 6min；MVD 阶段的干燥速率在微波功率从 300W 到 700W 升高过程中，也随之增大；其水分有效扩散系数也呈现增大趋势，即从 1.92×10^{-7}m^2/s 增加到 3.93×10^{-7}m^2/s；在小白杏 MVD 过程中，其平均活化能为 7.40W/g。

（3）在不同的微波温度条件下，水分比下降速率随微波温度的增加而变快，干燥时间越短。水分比下降速率最缓慢的干燥条件为微波温度设定在 40℃时，MVD 阶段的时间最长，耗时 9min；当微波温度为 60℃时，水分比下降速率最迅速，耗时 6min；在 MVD 阶段的干燥速率与微波温度呈现正相关关系，当微波温度在 40℃时，MVD 初始点的干燥速率最小（1.0345g/(g·h)）；微波温度的升高能够促进水分有效扩散系数的增大。在温度从 40℃升高至 60℃时，其值则由 2.32×10^{-7}m^2/s 增加至 2.81×10^{-7}m^2/s。

第 3 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥动力学模型研究

干燥动力学模型是采用数学公式来表达被抽象化的干燥过程[66]，研究干燥动力学模型一直以来都是干燥领域的研究焦点，因其能够揭示在各种干燥环境下，物料的水分比及干燥速率如何随着干燥时间而呈现出动态的变化规律。通过对物料的干燥动力学研究，能够使干燥过程得到优化，保证产品质量，干燥效率得到提升，同时为现有干燥设备的性能优化提供了关键信息。现今对于干燥动力学模型的研究较多，例如刘家璇[13]等研究了射频预处理对杏果热风干燥特性和干燥模型，发现 Herdenson and Pabis 模型拟合度最高；李丽霞[67]等以宝珠梨为试验对象，进行了微波热风耦合干燥，发现 Page 模型能够更好地预测宝珠梨干燥过程中水分比的变化规律。目前关于杏果的干燥动力学模型研究较少，所以本章在小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥特性基础之上，通过比较 12 种常用的干燥模型，选择了决定系数 R^2、离差平方和χ^2与均方根误差 *RMSE* 作为评估模型拟合精度的关键指标，选取能够较好的描述小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的模型，并得出由干燥模型转化而成的干燥参数表达式。

3.1 材料与方法

3.1.1 试验材料

试验材料与 2.1.1 所述材料相同。

3.1.2 仪器设备

仪器设备与 2.1.2 所述设备相同。

3.1.3 试验方法

试验方法与 2.1.3 所述方法相同。

3.1.4 试验参数测定

1.干基含水率

计算方法同 2.1.4 中式（2-1）。

2.水分比

计算方法同 2.1.4 中式（2-3）。

3.2 干燥模型基础理论

3.2.1 常见干燥模型

建立干燥数学模型对研究干燥过程、优化干燥工艺具有极大作用，选取目前常见的 12 种干燥模型[68]对将小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的不同转换点含水率、微波功率与微波温度的水分比 MR 与干燥时间 t 的关系线性化处理并进行回归拟合分析，模型见表 3-1。

表 3-1 常见的干燥模型

Table 3-1 Common drying model

序号	线性回归拟合方程	公式
1	Newton	$MR=\exp(-kt)$
2	Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)$
3	Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+\mathrm{c}$
4	Two term	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-gt)$
5	Modified Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-gt)+c\exp(-ht)$
6	Two term exponential	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$
7	Weram	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$
8	Page	$MR=\exp(-kt^{n})$
9	Modified Page	$MR=\exp(-(kt)^{n})$
10	Midilli	$MR=a\exp(-kt^{n})+\mathrm{bt}$
11	Parabolic	$MR=a+bt+ct^{2}$
12	Wang and Singh	$MR=1+at+bt^{2}$

3.2.2 模型评价指标

使用决定系数R^2、离差平方和χ^2作为评价指标，反映这 12 种干燥模型的拟合精度，其中R^2越大、χ^2及 *RMSE* 越小，说明拟合精度越高，拟合效果越好，其计算公式[69]为：

$$R^{2}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pi}-MR_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{N}(\overline{MR}_{pi}-MR_{i})^{2}} \tag{3-1}$$

$$\chi^{2}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{i}-MR_{pi})^{2}}{N-n} \tag{3-2}$$

$$RMSE=\left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_i-MR_{pi})^2}{N}\right]^{0.5} \tag{3-3}$$

式中：MR_{pi}为第 i 次预测水分比；

MR_i为第 i 次实测水分比；

N 为试验点数：

n 为因素水平个数。

3.3 数据处理与统计分析

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；采用 Matlab、Excel 软件计算和拟合干燥试验数据。

3.4 结果与讨论

3.4.1 不同转换点含水率下模型的建立

在固定微波功率 500W，微波温度 50℃，不同转换点含水率干燥条件下采用十二种常用干燥模型对小白杏干燥数据进行拟合，得到了各干燥模型的系数、R^2、χ^2以及 *RMSE*，结果如表 3-2 所示。得到的干燥模型拟合效果最佳的为 Midilli 模型，相对而言拟合效果最差的为 Newton 模型，Weram 与 Modified Page 模型的各类参数较为相同。Newton 模型的R^2最小，在 0.9937～0.9962 范围之间，χ^2及 *RMSE* 最大，分别在 0.9937～0.9960 和 0.0168～0.0188 范围之间，说明 Newton 模型的拟合质量不佳。Midilli 模型R^2在 0.9977～0.9985 范围内变化，其值最大；χ^2及 *RMSE* 最小，分别在 0.0018～0.0027 和 0.0104～0.0140 范围之间，相比于其他模型，其值较小，说明该模型与实际值最接近，拟合度相对较高。因此，不同转换点含水率下真空冷冻-微波真空联合干燥小白杏的干燥过程可以选择 Midilli 模型进行预测和描绘。

表 3-2 不同转换点含水率下的干燥模型拟合结果

Table 3-2 The fitting result of different moisture content of transition points

转换点含水率(%)	公式	系数	评价指标
45	$MR=\exp(-kt)$	$k=0.2483$	R^2=0.9959　χ^2=0.0057　*RMSE*=0.0169
	$MR=a\exp(-kt)$	$a=0.9704$ $k=0.2395$	R^2=0.9973　χ^2=0.0037　*RMSE*=0.0136
	$MR=a\exp(-kt)+\mathrm{c}$	$a=0.9244$ $k=0.2744$ $c=0.0593$	R^2=0.9980　χ^2=0.0027　*RMSE*=0.0117
	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-gt)$	$a=0.4852$ $k=0.2395$ $b=0.4852$ $g=0.2395$	R^2=0.9973　χ^2=0.0037　*RMSE*=0.0136
	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-gt)+c\exp(-ht)$	$a=0.3235$ $k=0.2395$ $c=0.3235$ $g=0.2395$ $h=0.2395$	R^2=0.9973　χ^2=0.0037　*RMSE*=0.0136
	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$	$a=0.3936$ $k=0.4452$	R^2=0.9981　χ^2=0.0027　*RMSE*=0.0117
	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	$a=0.0746$ $k=1.6675$ $g=0.2273$	R^2=0.9984　χ^2=0.0023　*RMSE*=0.0107
	$MR=\exp(-kt^n)$	$k=0.2818$ $n=0.9087$	R^2=0.9984　χ^2=0.0022　*RMSE*=0.0106
	$MR=\exp(-(kt)^n)$	$k=0.2481$ $n=0.9087$	R^2=0.9984　χ^2=0.0023　*RMSE*=0.0106
	$MR=a\exp(-kt^n)+\mathrm{bt}$	$a=0.9972$ $k=0.2389$ $n=0.8917$ $b=-0.0023$	R^2=0.9985　χ^2=0.0022　*RMSE*=0.0104
	$MR=a+bt+ct^2$	$a=0.9585$ $b=-0.2024$ $c=0.0135$	R^2=0.9957　χ^2=0.0061　*RMSE*=0.0174
	$MR=1+at+bt^2$	$a=-0.2241$ $k=0.0159$	R^2=0.9929　χ^2=0.0099　*RMSE*=0.0222
50	$MR=\exp(-kt)$	$k=0.2496$	R^2=0.9952　χ^2=0.0060　*RMSE*=0.0188
	$MR=a\exp(-kt)$	$a=0.9714$ $k=0.2402$	R^2=0.9966　χ^2=0.0042　*RMSE*=0.0157
	$MR=a\exp(-kt)+\mathrm{c}$	$a=0.9076$ $k=0.2843$ $c=0.0775$	R^2=0.9975　χ^2=0.0032　*RMSE*=0.0137

	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4857$ $k = 0.2402$ $b = 0.4857$ $g = 0.2402$	R^2=0.9966　χ^2=0.0042 *RMSE*=0.0157
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3238$ $k = 0.2402$ $c = 0.3238$ $g = 0.2402$ $h = 0.2402$	R^2=0.9966　χ^2=0.0042 *RMSE*=0.0157
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3602$ $k = 0.4852$	R^2=0.9975　χ^2=0.0031 *RMSE*=0.0135
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.0827$ $k = 1.4962$ $g = 0.2245$	R^2=0.9978　χ^2=0.0028 *RMSE*=0.0126
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2832$ $n = 0.9014$	R^2=0.9978　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0126
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2267$ $n = 0.9014$	R^2=0.9978　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0128
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9978$ $k = 0.2357$ $n = 0.8818$ $b = -0.0030$	R^2=0.9979　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0125
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9657$ $b = -0.2120$ $c = 0.0153$	R^2=0.9956　χ^2=0.0055 *RMSE*=0.0179
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2325$ $k = 0.0178$	R^2=0.9937　χ^2=0.0078 *RMSE*=0.0215
55	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2512$	R^2=0.9955　χ^2=0.0056 *RMSE*=0.0187
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9726$ $k = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8721$ $k = 0.3072$ $c = 0.1167$	R^2=0.9978　χ^2=0.0028 *RMSE*=0.0131
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$ $h = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9978　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0130

	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9979　χ^2=0.0026 *RMSE*=0.0128
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2855$ $n = 0.8905$	R^2=0.9980　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0126
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2447$ $n = 0.8905$	R^2=0.9980　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0126
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9981　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0125
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9968　χ^2=0.0039 *RMSE*=0.0157
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9959　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0178
	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2549$	R^2=0.9962　χ^2=0.0041 *RMSE*=0.0172
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9760$ $k = 0.2450$	R^2=0.9972　χ^2=0.0030 *RMSE*=0.0147
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8396$ $k = 0.3293$ $c = 0.1519$	R^2=0.9982　χ^2=0.0019 *RMSE*=0.0117
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4880$ $k = 0.2450$ $b = 0.4880$ $g = 0.2450$	R^2=0.9972　χ^2=0.0030 *RMSE*=0.0147
60	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3253$ $k = 0.2450$ $c = 0.3253$ $g = 0.2450$ $h = 0.2450$	R^2=0.9972　χ^2=0.0030 *RMSE*=0.0147
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.2914$ $k = 0.6026$	R^2=0.9982　χ^2=0.0019 *RMSE*=0.0118
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.1796$ $k = 0.7969$ $g = 0.1996$	R^2=0.9982　χ^2=0.0019 *RMSE*=0.0117
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2861$ $n = 0.8873$	R^2=0.9983　χ^2=0.0018 *RMSE*=0.0114
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2440$ $n = 0.8873$	R^2=0.9983　χ^2=0.0018 *RMSE*=0.0114
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9968$ $k = 0.2587$ $n = 0.9192$ $b = 0.0053$	R^2=0.9984　χ^2=0.0018 *RMSE*=0.0113

	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9826$ $b = -0.2421$ $c = 0.0225$	R^2=0.9978　χ^2=0.0024 *RMSE*=0.0130
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2566$ $k = 0.0251$	R^2=0.9974　χ^2=0.0028 *RMSE*=0.0143
65	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2616$	R^2=0.9937　χ^2=0.0037 *RMSE*=0.0168
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9820$ $k = 0.2528$	R^2=0.9972　χ^2=0.0031 *RMSE*=0.0155
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8307$ $k = 0.3358$ $c = 0.1616$	R^2=0.9976　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0143
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4910$ $k = 0.2528$ $b = 0.4910$ $g = 0.2528$	R^2=0.9972　χ^2=0.0031 *RMSE*=0.0155
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3273$ $k = 0.2528$ $c = 0.3273$ $g = 0.2528$ $h = 0.2528$	R^2=0.9972　χ^2=0.0031 *RMSE*=0.0155
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.2966$ $k = 0.5921$	R^2=0.9976　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0144
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.5000$ $k = 0.2616$ $g = 0.2616$	R^2=0.9967　χ^2=0.0037 *RMSE*=0.0168
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2845$ $n = 0.8993$	R^2=0.9977　χ^2=0.0026 *RMSE*=0.0140
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2471$ $n = 0.8993$	R^2=0.9977　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0140
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2344$ $n = 0.8884$ $b = -0.0047$	R^2=0.9977　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0140
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9880$ $b = -0.2555$ $c = 0.0267$	R^2=0.9975　χ^2=0.0028 *RMSE*=0.0146
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2681$ $k = 0.0296$	R^2=0.9973　χ^2=0.0030 *RMSE*=0.0151

3.4.2 不同微波功率下模型的建立

在固定转换点含水率 55%，微波温度 50℃，不同微波功率干燥条件下与十二种模型的拟合，通过比较各干燥模型的系数、R^2、χ^2以及 *RMSE* 来确定最适合的干燥模

型，结果如表 3-3 所示。十二种干燥模型的拟合效果最佳的为 Midilli 模型，其次为 Page 和 Modified Page 模型，这两个模型的评价指标较为相似，相较下来 Newton 模型的拟合效果最差。Newton 模型的R^2最小，在 0.9948～0.9958 范围之间，χ^2及 *RMSE* 最大，在 0.9955～0.9966、0.0180～0.0201 范围之间，说明 Newton 模型的拟合度差。Page 与 Modified Page 两个模型R^2在 0.9974～0.9981 范围内变化，χ^2及 *RMSE* 在 0.0024～0.0036、0.0120～0.0141 范围之间，Midilli 模型R^2在 0.9975～0.9981 范围内变化，χ^2及 *RMSE* 在 0.0024～0.0035、0.0120～0.0141 范围之间，Midilli 模型的离差平方和与 Page 及 Modified Page 两个模型相比略小，说明该模型拟合精度相对较高，能较好的预测干燥过程。因此，选择 Midilli 模型作为描述不同微波功率下小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥过程的基础模型。

表 3-3 不同微波功率下的干燥模型拟合结果

Table 3-3 The fitting result of different microwave power

微波功率(W)	公式	系数	评价指标
300	$MR=\exp(-kt)$	$k=0.2512$	R^2=0.9956　χ^2=0.0066 *RMSE*=0.0187
	$MR=a\exp(-kt)$	$a=0.9726$ $k=0.2413$	R^2=0.9966　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0163
	$MR=a\exp(-kt)+\mathrm{c}$	$a=0.8721$ $k=0.3072$ $c=0.1167$	R^2=0.9975　χ^2=0.0038 *RMSE*=0.0141
	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-gt)$	$a=0.4863$ $k=0.2413$ $b=0.4863$ $g=0.2413$	R^2=0.9966　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0163
	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-gt)+c\exp(-ht)$	$a=0.3242$ $k=0.2413$ $c=0.3242$ $g=0.2413$ $h=0.2413$	R^2=0.9966　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0163
	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$	$a=0.3161$ $k=0.5538$	R^2=0.9975　χ^2=0.0037 *RMSE*=0.0140
	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	$a=0.8794$ $k=0.2141$ $g=1.0468$	R^2=0.9975　χ^2=0.0037 *RMSE*=0.0139
	$MR=\exp(-kt^n)$	$k=0.2855$ $n=0.8905$	R^2=0.9976　χ^2=0.0036 *RMSE*=0.0137
	$MR=\exp(-(kt)^n)$	$k=0.2447$ $n=0.8905$	R^2=0.9976　χ^2=0.0036 *RMSE*=0.0137

	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9976　χ^2=0.0035 *RMSE*=0.0137
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9967　χ^2=0.0050 *RMSE*=0.0162
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9959　χ^2=0.0061 *RMSE*=0.0179
400	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2512$	R^2=0.9958　χ^2=0.0055 *RMSE*=0.0180
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9726$ $k = 0.2413$	R^2=0.9970　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0153
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8721$ $k = 0.3072$ $c = 0.1167$	R^2=0.9979　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0125
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9970　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0153
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$ $h = 0.2413$	R^2=0.9970　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0153
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9980　χ^2=0.0026 *RMSE*=0.0124
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9980　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0122
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2855$ $n = 0.8905$	R^2=0.9981　χ^2=0.0024 *RMSE*=0.0120
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2447$ $n = 0.8905$	R^2=0.9981　χ^2=0.0024 *RMSE*=0.0120
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9981　χ^2=0.0024 *RMSE*=0.0120
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9970　χ^2=0.0038 *RMSE*=0.0150
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9962　χ^2=0.0050 *RMSE*=0.0171
500	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2512$	R^2=0.9955　χ^2=0.0056 *RMSE*=0.0187

	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9726$ $k = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8721$ $k = 0.3072$ $c = 0.1167$	R^2=0.9978　χ^2=0.0028 *RMSE*=0.0131
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$ $h = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9978　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0130
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9979　χ^2=0.0026 *RMSE*=0.0128
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2855$ $n = 0.8905$	R^2=0.9980　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0126
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2447$ $n = 0.8905$	R^2=0.9980　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0126
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9981　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0125
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9968　χ^2=0.0039 *RMSE*=0.0157
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9959　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0178
600	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2512$	R^2=0.9949　χ^2=0.0056 *RMSE*=0.0194
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9726$ $k = 0.2413$	R^2=0.9963　χ^2=0.0041 *RMSE*=0.0165
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8721$ $k = 0.3072$ $c = 0.1167$	R^2=0.9975　χ^2=0.0028 *RMSE*=0.0136
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9963　χ^2=0.0041 *RMSE*=0.0165

	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$ $h = 0.2413$	R^2=0.9963　χ^2=0.0041 *RMSE*=0.0165
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9975　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0135
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9976　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0133
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2855$ $n = 0.8905$	R^2=0.9977　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0130
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2447$ $n = 0.8905$	R^2=0.9977　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0130
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9977　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0130
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9964　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0162
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9954　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0184
700	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2512$	R^2=0.9948　χ^2=0.0061 *RMSE*=0.0201
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9726$ $k = 0.2413$	R^2=0.9961　χ^2=0.0045 *RMSE*=0.0173
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8721$ $k = 0.3072$ $c = 0.1167$	R^2=0.9972　χ^2=0.0032 *RMSE*=0.0146
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9961　χ^2=0.0045 *RMSE*=0.0173
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$ $h = 0.2413$	R^2=0.9961　χ^2=0.0045 *RMSE*=0.0173
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9973　χ^2=0.0032 *RMSE*=0.0145
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9973　χ^2=0.0031 *RMSE*=0.0144

$MR=\exp(-kt^n)$	$k=0.2855$ $n=0.8905$	R^2=0.9974　χ^2=0.0030 *RMSE*=0.0141
$MR=\exp(-(kt)^n)$	$k=0.2447$ $n=0.8905$	R^2=0.9974　χ^2=0.0030 *RMSE*=0.0141
$MR=a\exp(-kt^n)+\mathrm{bt}$	$a=0.9973$ $k=0.2465$ $n=0.9001$ $b=0.0008$	R^2=0.9975　χ^2=0.0030 *RMSE*=0.0141
$MR=a+bt+ct^2$	$a=0.9750$ $b=-0.2270$ $c=0.0186$	R^2=0.9962　χ^2=0.0044 *RMSE*=0.0171
$MR=1+at+bt^2$	$a=-0.2446$ $k=0.0211$	R^2=0.9953　χ^2=0.0055 *RMSE*=0.0192

3.4.3 不同微波温度下模型的建立

在固定转换点含水率 55%，微波功率 500W 下，不同微波温度对小白杏联合干燥的水分比 MR 与时间 t 之间关系分别与 12 种干燥模型分别进行了拟合，得到了各种干燥模型的系数、R^2、χ^2以及 *RMSE*，计算结果如表 3-3 所示。其中，各干燥模型的拟合效果最佳的为 Midilli 模型，其次为 Page 和 Modified Page 模型，两个模型的评价指标较为相似，拟合效果最差的为 Newton 模型。Newton 模型的R^2最小，在 0.9950～0.9961 范围之间，χ^2及 *RMSE* 最大，分别在 0.9951～0.9956、0.0174～0.0193 范围之间，这表明 Newton 模型的拟合度差。Page 与 Modified Page 两个模型R^2在 0.9978～0.9985 范围内变化，χ^2及 *RMSE* 在 0.0020～0.0025、0.0110～0.0129 范围之间，Midilli 模型R^2在 0.9978～0.9985 范围内变化，χ^2及 *RMSE* 在 0.0020～0.0025、0.0109～0.0125 范围之间，Midilli 模型的均方根误差与 Page 与 Modified Page 两个模型相比略小，说明该模型拟合精度相对较高，能较好的预测干燥过程，因此选择 Midilli 模型作为描述不同微波功率下小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥过程的基础模型。

表 3-4 不同微波温度下的干燥模型拟合结果

Table 3-4 The fitting result of different microwave temperature

微波温度(℃)	公式	系数	评价指标
40	$MR=\exp(-kt)$	$k=0.2512$	R^2=0.9961　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0174
	$MR=a\exp(-kt)$	$a=0.9726$ $k=0.2413$	R^2=0.9973　χ^2=0.0036 *RMSE*=0.0145
	$MR=a\exp(-kt)+\mathrm{c}$	$a=0.8721$ $k=0.3072$ $c=0.1167$	R^2=0.9983　χ^2=0.0023 *RMSE*=0.0116

	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9973　χ^2=0.0036 *RMSE*=0.0145
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$ $h = 0.2413$	R^2=0.9973　χ^2=0.0036 *RMSE*=0.0145
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9983　χ^2=0.0022 *RMSE*=0.0115
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9984　χ^2=0.0022 *RMSE*=0.0113
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2855$ $n = 0.8905$	R^2=0.9985　χ^2=0.0020 *RMSE*=0.0110
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2447$ $n = 0.8905$	R^2=0.9985　χ^2=0.0020 *RMSE*=0.0110
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9985　χ^2=0.0020 *RMSE*=0.0109
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9974　χ^2=0.0035 *RMSE*=0.0142
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9965　χ^2=0.0046 *RMSE*=0.0164
50	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2512$	R^2=0.9955　χ^2=0.0056 *RMSE*=0.0187
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9726$ $k = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8721$ $k = 0.3072$ $c = 0.1167$	R^2=0.9978　χ^2=0.0028 *RMSE*=0.0131
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$	R^2=0.9968　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0159
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$h = 0.2413$ $a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9978　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0130

	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9979　χ^2=0.0026 *RMSE*=0.0128
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2855$ $n = 0.8905$	R^2=0.9980　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0126
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2447$ $n = 0.8905$	R^2=0.9980　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0126
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9981　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0125
	$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9968　χ^2=0.0039 *RMSE*=0.0157
	$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9959　χ^2=0.0051 *RMSE*=0.0178
	$MR = \exp(-kt)$	$k = 0.2512$	R^2=0.9950　χ^2=0.0056 *RMSE*=0.0193
	$MR = a\exp(-kt)$	$a = 0.9726$ $k = 0.2413$	R^2=0.9964　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0163
	$MR = a\exp(-kt) + \mathrm{c}$	$a = 0.8721$ $k = 0.3072$ $c = 0.1167$	R^2=0.9976　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0134
	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt)$	$a = 0.4863$ $k = 0.2413$ $b = 0.4863$ $g = 0.2413$	R^2=0.9964　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0163
60	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	$a = 0.3242$ $k = 0.2413$ $c = 0.3242$ $g = 0.2413$ $h = 0.2413$	R^2=0.9964　χ^2=0.0040 *RMSE*=0.0163
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.3161$ $k = 0.5538$	R^2=0.9976　χ^2=0.0027 *RMSE*=0.0133
	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.8794$ $k = 0.2141$ $g = 1.0468$	R^2=0.9977　χ^2=0.0026 *RMSE*=0.0131
	$MR = \exp(-kt^n)$	$k = 0.2855$ $n = 0.8905$	R^2=0.9978　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0129
	$MR = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.2447$ $n = 0.8905$	R^2=0.9978　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0129
	$MR = a\exp(-kt^n) + \mathrm{bt}$	$a = 0.9973$ $k = 0.2465$ $n = 0.9001$ $b = 0.0008$	R^2=0.9978　χ^2=0.0025 *RMSE*=0.0128

$MR = a + bt + ct^2$	$a = 0.9750$ $b = -0.2270$ $c = 0.0186$	R^2=0.9965　χ^2=0.0039 *RMSE*=0.0161
$MR = 1 + at + bt^2$	$a = -0.2446$ $k = 0.0211$	R^2=0.9955　χ^2=0.0050 *RMSE*=0.0183

3.5 本章小结

本章主要将真空冷冻-微波真空联合干燥应用于小白杏干制品加工，在不同转换点含水率（45%、50%、55%、60%、65%）、微波功率（300W、400W、500W、600W、700W）、微波温度（40℃、50℃、60℃）干燥条件下，采用选取的 12 种果蔬常用干燥数学模型进行联合干燥的水分比曲线拟合分析，并利用决定系数R^2、离差平方和χ^2以及均方根误差 *RMSE* 对模型的拟合精度进行评价，主要结论为：

干燥过程涉及复杂的非稳态传热、传质过程，容易受干燥条件，干燥方法等多种因素的影响。通过不同条件下小白杏联合干燥的水分比与 12 种干燥数学模型的拟合，发现 Midilli 模型最适合描述不同转换点含水率、不同微波功率、不同微波温度下小白杏联合干燥的降水过程，Midilli 方程符合小白杏联合干燥过程的变化规律，可用于预测小白杏联合干燥过程失水率的变化过程，以期为小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的工艺优化、联合干燥设各的设计提供参考。

第 4 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥工艺优化

杏果的干燥工艺对其质量和营养价值的保存有着显著影响，因此，在提升小白杏干制产品品质和效益方面起着关键作用。真空冷冻-微波真空联合干燥（Freeze-Microwave vacuum drying，FD-MVD）成功地整合了两种干燥方法的优势，既确保了干燥的质量，又减少了干燥的时间。然而，关于小白杏的 FD-MVD 干燥工艺参数的研究报告仍然不足。在第二章中，深入探讨了小白杏的干燥特性，结果显示，这种干燥方法可以有效解决小白杏冷冻干燥过程中干燥速率缓慢的问题，从而实现进一步缩短干燥时间并提高干燥质量的目标。在此基础上，首先，进一步探讨了小白杏在 FD-MVD 过程的转换点含水率，并结合干燥时间以及产品质量等因素进行综合分析。其次，微波功率是影响联合干燥时间和品质的重要因素，因此，研究了不同微波功率对干燥时间和品质的影响。最后，因为小白杏在 MVD 过程中可能会导致营养成分的损失，为了探究小白杏在冷冻干燥之后，微波真空干燥过程中的最佳温度区间，进行了试验性的研究。基于此，在本章中，从单一变量的角度出发，探讨不同转换点含水率、微波功率及微波温度如何影响干燥过程中的干燥时间、维生素 C 含量及色泽的变化。对小白杏 FD-MVD 的工艺参数采用响应曲面法来优化，得出在保持较优的产品品质的同时干燥耗时能极大缩短的小白杏联合干燥方式，确定了一套相对理想且实用的联合干燥工艺参数，为生产实践提供了理论依据，也提供了技术支持。

4.1 材料与方法

4.1.1 试验材料

试验材料与 2.1.1 所述材料相同。

4.1.2 试验试剂

试剂：草酸，郑州派尼化学试剂厂；L-抗坏血酸标准品，北京索莱宝科技有限公司；2,6-二氯靛酚钠盐，上海瑞永生物科技有限公司；$NaHCO_3$，天津永晟精细化工有限公司。

4.1.3 仪器设备

Christ Alpha 1－2Ldplus 实验室真空冷冻干燥机（德国 Christ 真空冷冻干燥机有限

公司）；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）；CR－400 型色差仪（日本柯尼卡美能达公司）；BSM－4220.4 电子天平（上海卓精电子科技有限公司，精确度 0.0001g ）。

4.1.4 试验方法

1.试验工艺流程

小白杏→挑选鲜果→冷藏(4℃冰柜，使水分分布均匀)→清洗→沥干→切分→去核→摆盘→干燥→冷却→真空装袋→成品→指标测定。

操作要点：将清洗好的小白杏用厨房纸去除切片表面多余的水，沿果缝切半，将果核取出，取(100±1)g 样品，备用。

2.单因素试验设计

进行小白杏 FD-MVD 在不同干燥条件下，即转换点含水率、微波功率、微波温度的单一变量试验（具体干燥试验参数同 2.1.3 中表 2-1），选用干燥时间、维生素 C 含量、干制品色泽（ΔE）为考察指标，确定小白杏 FD-MVD 时各试验因素最适宜的范围。将进行的 3 次重复试验的结果取平均值，作为最终的数据。

3.响应面优化设计

基于单因素的试验，在优化工艺参数时，自变量选择转换点含水率(X_1)、微波功率(X_2)、微波温度(X_3)，研究以上因素与干燥时间(Y_1)、Vc 含量(Y_2)、色差值ΔE(Y_3)的关系，为找出最优的干燥工艺参数，进行响应面试验，响应面试验各因素与水平见表 4-1。

表 4-1 试验因素水平表

Table 4-1 Factors and levels of the test

因素	水平		
	-1	0	1
转换点含水率 X_1/%	55	60	65
微波功率 X_2/W	400	500	600
微波温度 X_3/℃	40	50	60

4.1.5 试验参数测定

1.干基含水率

计算方法同 2.1.4 中式（2-1）。

2.水分比

计算方法同 2.1.4 中式（2-3）。

3.色泽

根据 CIELAB 表色仪，选择具有代表性的干燥试样，选择 CR-400 色差仪测定干

制品色度 L^*、a^*、b^*值。干制品与新鲜样本之间的色泽差异值ΔE根据下式计算，ΔE值越小，意味着干制品与鲜样的颜色差异越小，色彩质量更高，色泽品质更好[70]。

$$\Delta \mathrm{E}=\sqrt{(L^*-L^*_0)^2+(\mathrm{a}^*-a^*_0)^2+(b^*-b^*_0)^2} \tag{4-1}$$

式中 L^*、a^*、b^*为干制品明亮度、红绿值、蓝黄值；L^*_0、a^*_0、b^*_0分别表示鲜样明亮度、红绿值、蓝黄值。

4.维生素 C 含量的测定

为了使溶液颜色对于检测结果不造成影响，采用 2,6-二氯靛酚反滴定法[71]来测顶小白杏中的维生素 C 含量。

4.1.6 统计分析方法

应用 SPSS 27.0 软件进行数据统计分析；采用 Design-Expert 12 软件处理响应面分析，结果输出为平均值，差异显著性分析通过单因素方差分析（ANOVA）方法进行分析，差异显著性水平为 P<0.05。Origin 2022 软件完成数据绘制。

4.2 结果与讨论

4.2.1 单因素试验结果与分析

（1）转换点含水率对干燥时间及品质的影响

在设定在冷冻温度为-40℃、微波功率为 500W、微波温度为 50℃的试验环境下，不同转换点含水率对小白杏 FD-MVD 的干燥时间、维生素 C 含量和色泽的影响如图 4-1 所示。即图可见，维生素 C 含量由于随着转换点含水率的变化，先呈现出上升趋势，后又开始下降，干燥时间与转换点含水率呈现正相关变化，而色差值呈现出负相关变化。经由分析，转换点含水率越大时即 65%，干燥所需的时间为 3.67h（其中 MVD 阶段的干燥时间为 10min），表明经过冷冻干燥后小白杏中剩余水分含量越多，冷冻干燥的时间越短。这是因为 FD 分为升华干燥阶段和解析干燥阶段，干燥初期为升华段，在低温真空的环境下，物料开始升华，能快速去除物料中处于冻结状态的游离水。在升华干燥完成后，还有部分吸附在物料上的结合水需要通过解析干燥逸出，该阶段是冷冻干燥中较为缓慢的一部分，耗时较长。当转换点含水率高时，处于升华干燥阶段，所以干燥时间就越短[14]。由图可知，随着转换点含水率的降低，维生素 C 的含量先增加后下降。当转换点含水率为 50%（61.677mg/100g）和 45%（53.073mg/100g）时，维生素 C 含量相对较低。这是由于随着转换点含水率的提高，小白杏在微波真空干燥设备中的处理时间也随之延长。与冷冻干燥相比，微波真空干燥过程会导致更多的维生素 C 的流失。相反，在以较低的含水率进行转换时，会导

致冷冻干燥过程久、耗时长，从而造成维生素 C 含量的损失[38]。当转换点含水率在60%时，维生素 C 含量较高为 79.17mg/100g。当小白杏干制品色泽与鲜果颜色越接近时，色差值ΔE 更小，干制品品质往往更高。

通过分析，色泽随着转换点含水率的降低而降低，这是因为转换点含水率过高时的微波真空干燥的时间更长，由于化学反应过程中色素物质（如类胡萝卜素）的持续参与，小白杏的颜色会出现显著的变化。此外，MVD 为热干燥，随着干燥时间的延长，褐变反应的强度会加重，这对于保持小白杏原本的颜色并不有利。因此，需要选择能够缩短干燥时间且能有效保存维生素 C 和色泽转换点含水率范围，在 55%~65%较为合适。

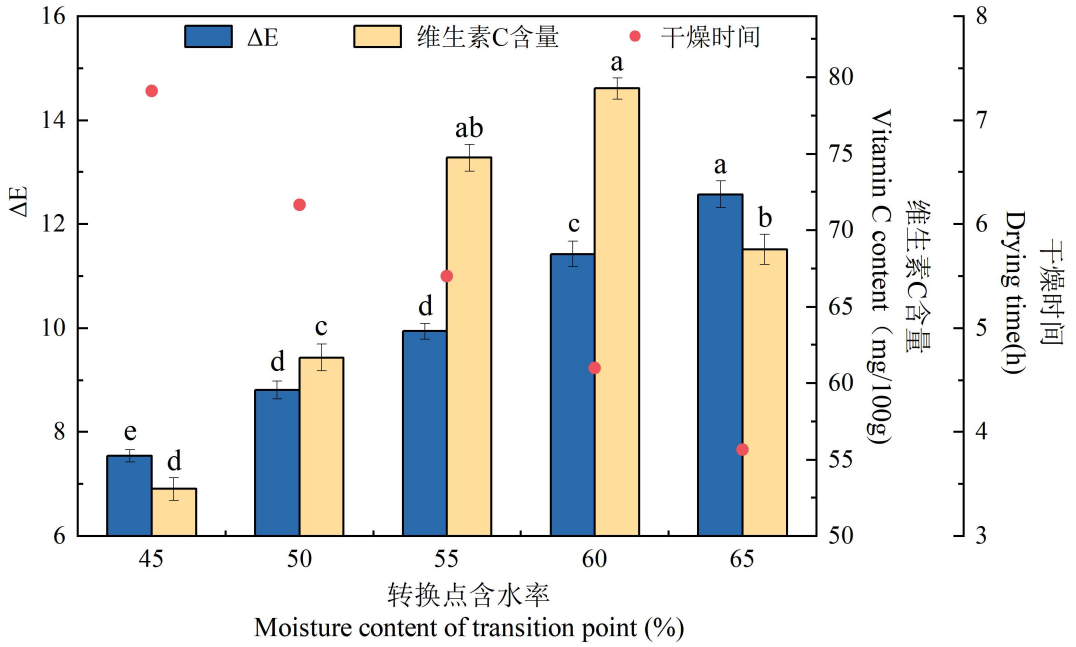


图 4-1 不同转换点含水率下小白杏的干燥时间、色差及维生素 C 含量

Fig.4-1 Drying time, Δ E,and vitamin C content at different converted moisture content

（2）微波功率对干燥时间及品质的影响

固定冷冻温度在-40℃、转换点含水率在 55%、微波温度在 50℃时，不同微波功率对小白杏 FD-MVD 干燥时间、维生素 C 含量及色泽的影响如图 4-2 所示。当微波功率为 500W 时，干制品的维生素 C 含量最高（74.64±2.58mg/100g）、色差值ΔE 最小（11.20±0.22）。当含水率达到 55 %时，微波段干燥时间随微波功率（300、400、500、600、700W）的升高而减少。由于在 MVD 过程当中，微波能量能够直接影响到介质分子，较高的微波功率可以提供更多的能量，使物料更快地产生热量，进而加速水分蒸发。随着微波功率的增强，每单位质量的物质所接收到的微波功率密度也相应提升，这使得物质能够迅速吸收并转化微波能为热能，进一步推动了物料与周围热空气形成更大的水分梯度，同时物料内部的传质速率也得到了提高，有效地缩短了干

燥所需时间[72]。当微波功率逐渐增大时，小白杏中维生素 C 含量呈现出一种先上升后下降的趋势。这是因为在微波功率较低的情况下，干燥过程需要花费更多的时间，而在此期间，维生素 C 可能会因氧化反应而在氧气环境下遭到破坏；微波功率提高会带来热能提升，在高温环境下，有效活性物质容易遭受破坏，进而加速维生素 C 的流失，最终影响总量导致下降。同时，微波功率的变化也影响着色差值ΔE，其波动模式是先减小后增大，当微波功率在 300~500W 之间时，随着干燥过程的缩短，ΔE 值会逐渐降低；当微波功率在 500~700W 之间时，随着干燥功率的增强，ΔE 值又开始上升。值得注意的是，在这个范围内，300W 和 700W 这两个微波功率下的色差最大，这可能是由于长时间的干燥以及高功率会导致色泽的褐变速度加快[73]。微波功率较低的情况下，小白杏在微波真空干燥机中的干燥时间会相对较长，这意味着物料与空气的接触时间也会相应地延长，因此，褐变反应的发生程度会更高，从而导致颜色与新鲜状态有较大的差异。相反，如果微波功率过高，物料在单位时间内吸收的微波能就会增加，这将导致温度急剧上升，小白杏内部的水分迅速蒸发，导致外部干燥不充分，容易出现焦糊情况，这会对色泽造成负面影响，进而导致ΔE 值的上升。综上所述，为了使小白杏干制品的维生素 C 含量损失更少、色泽与鲜样更为接近，微波功率的适宜选择范围为 400~600W。

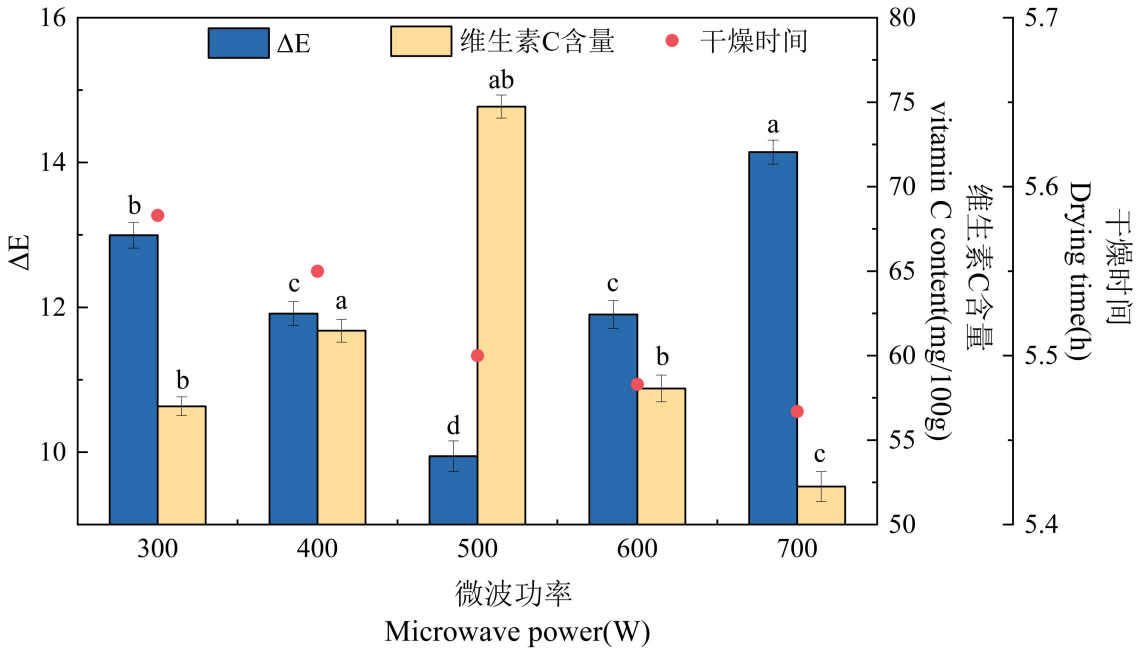


图 4-2 不同微波功率下的小白杏干燥时间、色差及维生素 C 含量

Fig.4-2 Drying time, Δ E,and vitamin C content at different microwave power

（3）微波温度对干燥时间及品质的影响

固定冷冻温度在-40℃、转换点含水率在 55%、微波功率为 500W 时，不同微波温度对小白杏 FD-MVD 干燥时间、维生素 C 含量及色泽的影响如图 4-3 所示。微波

温度对于小白杏的干燥中所需的时间、维生素 C 含量及色差，都产生了较深的影响。随着微波温度的提高，干燥时间和维生素 C 含量呈现出下降趋势，然而，色差值ΔE却呈现出上升的态势。这是因为温度的提高加速了小白杏内部水分蒸发的速度，使得物料进入一个快速脱水的状态，从而有效地减少了干燥所需的时间[65]。当微波温度增加时，维生素 C 含量也随之降低，在 50℃时，维生素 C 含量达到了最大值，为 74.74±2.58mg/100g，而在温度达到 60℃时，维生素含量最低为 55.00±2.09mg/100g，是 50℃条件下的 73.6%。尽管温度的提升能加速干燥的过程，但是如果温度过高，可能会导致维生素 C 的受热分解，对维生素 C 的保留产生不利影响[39]。此外，其色差随温度升高呈增大的趋势，这可能是因为温度的升高加快了小白杏中还原糖和氨基酸发生的美拉德反应，杏干制品与鲜杏之间的差值逐渐增加，小白杏色泽越差[17]。综合分析，为了实现较短的干燥时间以及更好的保留维生素 C 及色泽，选择将微波温度设定在 40 到 50℃的区间内较为合理。

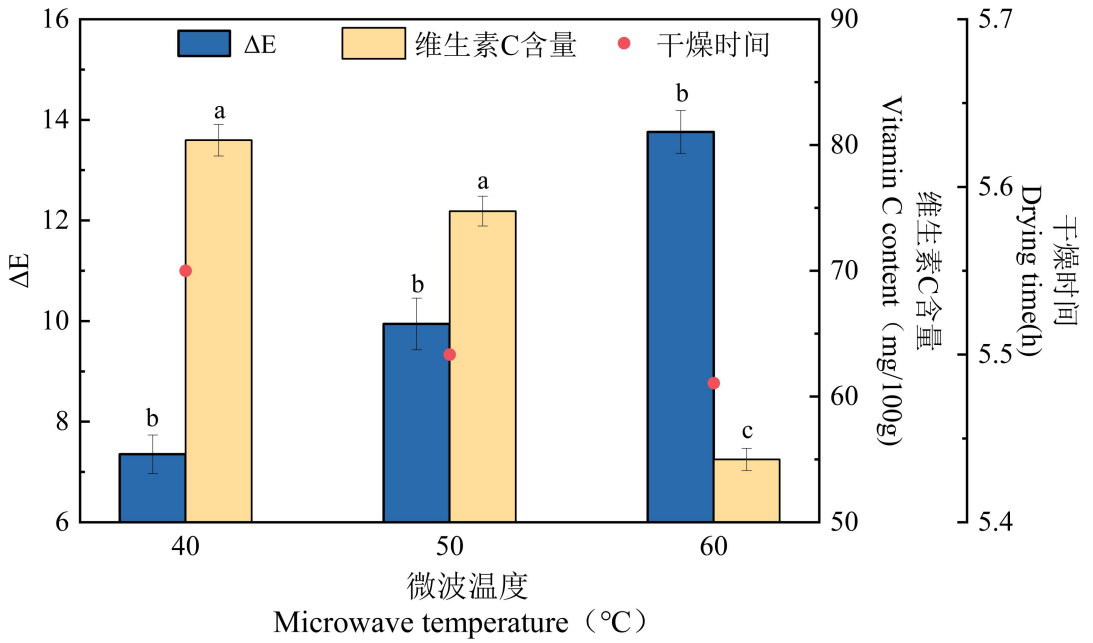


图 4-3 不同微波温度下的小白杏干燥时间、色差及维生素 C 含量

Fig.4-3 Drying time, Δ E,and vitamin C content at different microwave temperature

4.2.2 响应面试验设计与结果

基于 Box-Behnken 响应面设计设计原则，采用单因素实验法，选用干燥时间（Y_1）、维生素 C 含量（Y_2）、色差值 Δ E（Y_3）3 个指标作为响应值，对小白杏 FD-MVD 过程中的转换点含水率（X_1）、微波功率（X_2）、微波温度（X_3）3 个因素进行设计优化。试验设计与结果如表 4-2 所示。

表 4-2 响应面试验设计与结果

Table 4-2 Design and results of response surface test

序号	转换点含水率 X_1/%	微波功率 X_2/W	微波温度 X_3/℃	干燥时间 Y_1/min	Vc 含量 Y_2(mg/100g)	色差值 Y_3
1	55	400	50	361	63.333	10.01
2	65	400	50	262	80.385	14.24
3	55	600	50	358	48.605	11.13
4	65	600	50	259	79.167	14.87
5	55	500	40	363	64.381	9.68
6	65	500	40	264	87.083	14.04
7	55	500	60	359	41.8	13.02
8	65	500	60	259	76	15.86
9	60	400	40	301	90.086	11.19
10	60	600	40	298	75.18	12.13
11	60	400	60	296	75.724	12.91
12	60	600	60	292	61.834	14.98
13	60	500	50	295	72.069	11.92
14	60	500	50	295	74.113	11.98
15	60	500	50	295	76.277	11.97
16	60	500	50	295	73.077	11.51
17	60	500	50	294	71.575	11.83

4.2.3 回归模型拟合及方差分析

通过 Design-Expert 13 对表 4-2 中的试验结果进行回归拟合，Box-Behnken 试验得出的二次回归模型，具体结果如式（4-3）~（4-5）所示。各回归模型的方差分析及显著性分析如表 4-3 所示。

Box-Behnken 试验拟合得出小白杏联合干燥工艺的回归方程为：

$$Y_1=297.80-49.62X_1-1.63X_2-2.50X_3-0.25X_1X_3 -0.25X_2X_3+14.85X_1^2+0.35X_2^2+1.60X_3^2 \quad (4-3)$$

$$Y_2=73.42+13.06X_1-5.59X_2-7.67X_3+3.38X_1X_2 +2.87X_1X_3+0.254X_2X_3-6.97X_1^2+1.42X_2^2+0.864X_3^2 \quad (4-4)$$

$$Y_3=11.84+1.90X_1+0.595X_2+1.22X_3-0.122X_1X_2$$

$$-0.38X_1X_3+0.283X_2X_3+0.534X_1^2+0.187X_2^2+0.774X_3^2 \quad (4-5)$$

表 4-3 回归模型方差分析

Table 4-3 Regression model analysis of variance

方差来源	干燥时间 Y_1		维生素 C 含量 Y_2		色差值 Y_3	
	F 值	*P* 值	*F* 值	*P* 值	*F* 值	*P* 值
Model	10403.14	＜0.0001***	37.07	＜0.0001***	80.76	＜0.0001***
X_1	8897.82	＜0.0001***	191.75	＜0.0001***	430.30	＜0.0001***
X_2	95.40	＜0.0001***	35.14	0.0006**	42.37	0.0003**
X_3	225.81	＜0.0001***	66.12	＜0.0001***	177.02	＜0.0001***
X_1X_2	0.00	1.00	6.41	0.0392*	0.8979	0.3749
X_1X_3	1.13	0.3233	4.64	0.0682	8.64	0.0217*
X_2X_3	1.13	0.3233	0.0362	0.8544	4.78	0.0651
X_1^2	4193.30	＜0.0001***	28.72	0.0011**	17.96	0.0039**
X_2^2	2.33	0.1708	1.19	0.3110	2.19	0.1824
X_3^2	48.68	0.002**	0.4410	0.5279	37.73	0.0005**
失拟项	1.25	0.4028	3.42	0.1330	2.77	0.1746
C.V.%	0.16		3.75		2.06	
决定系数 R^2	0.9999		0.9795		0.9905	

注：*显著（0.01<P<0.05）；**高度显著（0.0001<P<0.01）；***极极显著（P<0.0001）。

Note:*significant(0.01<P<0.05);**highly significant(0.0001<P<0.01);***extremely significant(P<0.0001).

从表 4-3 看出，上述 3 个回归模型都呈现出高度的显著性，响应面试验误差较小，可信度很高，可从失拟项均不显著得出[74]。3 个回归模型的变异系数较小，表明变异程度相对较低，精确性较高。另外，3 个回归模型的决定系数 R^2 都非常接近 1，这意味着具有良好的拟合关系，回归模型具有实质性的应用价值。对 MVD 阶段的干燥时间回归模型进行分析，发现干燥时间回归方程的对应的 P 值<0.000 1，这意味着此模型具有极高的显著性；因素 X_3^2 对于干燥时间的影响是高度显著的（P=0.002）。从 F 值的结果来看，各个因素对干燥时间的贡献大小顺序依次为：转换点含水率（X_1）、微波温度（X_3）、微波功率（X_2），且 $X_1^2>X_3^2>X_2^2$；而失拟项 F_{Lf} 为 1.25，其对应的 P_{Lf} 值为 0.402 8（P_{Lf}>0.05），这说明失拟项并不显著，进一步证实了试验中的误差相对较小；回归方程的 R^2 为 0.999 9，这意味着线性拟合程度达到了 99.99%，可以较为准确地预测干燥时间。维生素 C 含量回归模型中，显著性 F 值为 37.07，对应的 P 值<0.000 1；由 F 值分析可得，各因素对维生素 C 含量的贡献度由大到小的顺序依次为：转换点含水率（X_1）、微波温度（X_3）、微波功率（X_2）；失拟项 F_{Lf} 为 3.24，对应的 P_{Lf} 值为 0.133 0（P_{Lf}>0.05），代表性的失拟程度不明显，表示试验误差较小；回归方程 R^2 为 0.979 5，说明线性拟合程度达 97.95%，即该模型可以很好的预测维生素 C 的含量。在色差回归模型中，显著性 F 值为 80.76，对应的 P 值<0.000 1，这意味着

该模型具有很高的显著性。此外，发现因素 X_1、X_3 对于色差值ΔE 的影响非常显著。各因素对色差值ΔE 的影响由大到小的顺序依次为：转换点含水率（X_1）、微波温度（X_3）、微波功率（X_2）；色差值回归方程的 R^2 高达 0.99 以上，能够较好的预测色差值[63]。

4.2.4 各因素交互作用分析

通过观察响应曲面图，可以了解各因素对于响应指标的影响。如果响应面的坡度倾斜平缓，即此因素影响微弱；然而，若响应面的倾斜陡峭，则表示此因素的影响显著[75]。基于对回归模型和显著性进行分析，发现因素交互项 X_1X_2、X_1X_3、X_2X_3 对响应指标的影响是显著的。为此绘制了响应曲面图和等高线图来进行对比展示，见图 4-4~图 4-6。

图 4-4 显示了在微波温度 50℃下，转换点含水率与微波功率对干燥时间的交互作用。分析可知，在设置特定的转换点含水率下，微波功率的增加可缩短干燥时间；如果微波功率维持在一个恒定水平，那么随着干燥转换点含水率的提高，干燥过程将需要更多的时间。结果显示，转换点含水率在 55%左右时，其干燥时间最大，表明较低的转换点含水率对小白杏的干燥时间不利。

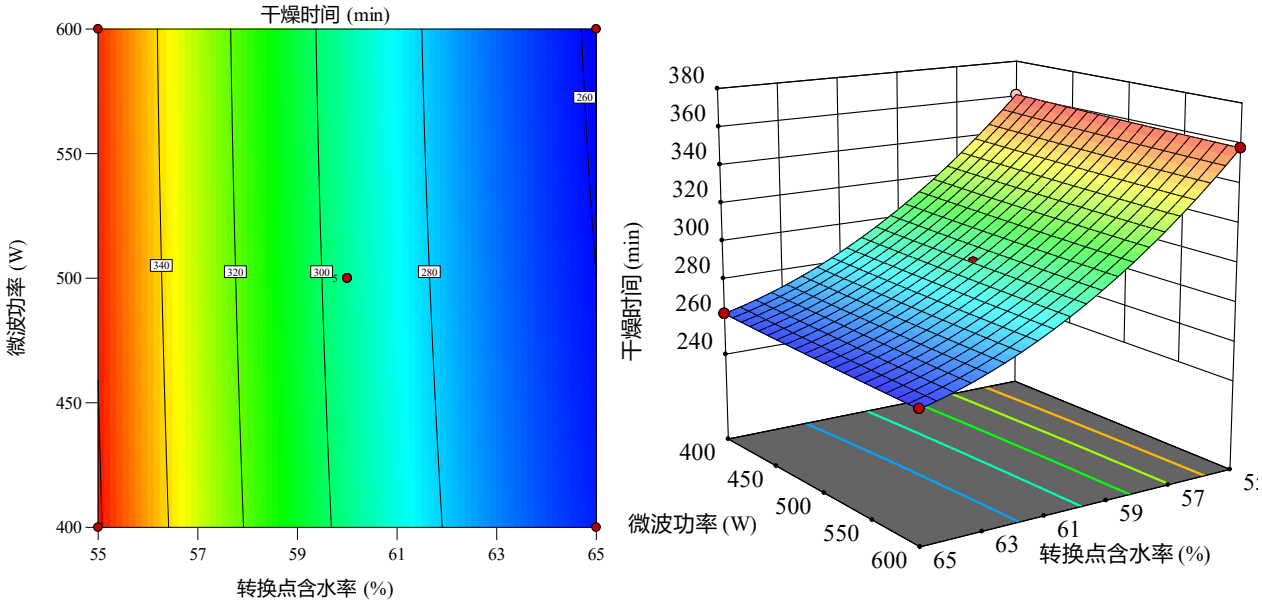
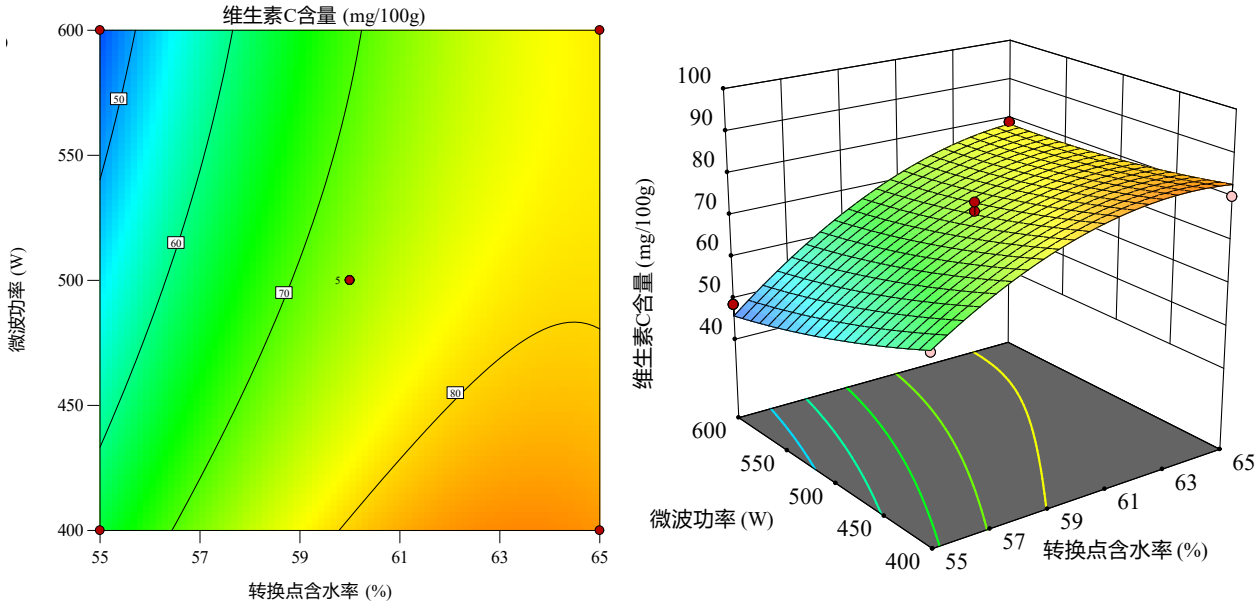


图 4-4 交互作用对干燥时间的影响

Fig.4-4 The effect of interaction on drying time

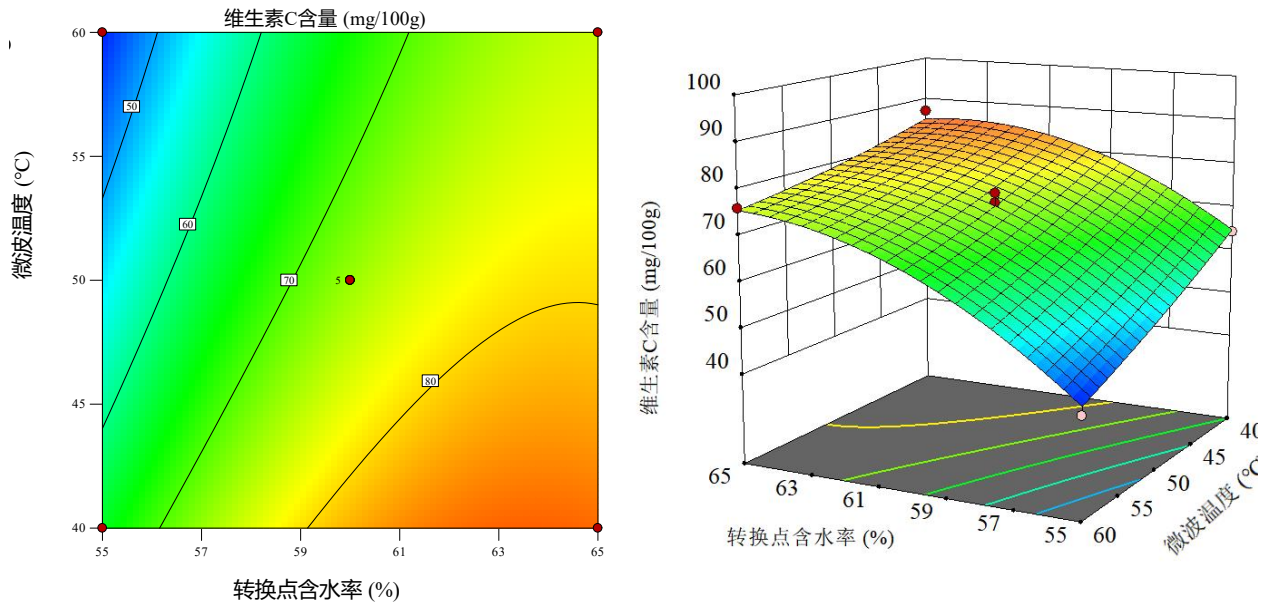
图 4-5 为交互作用对维生素 C 含量的影响，由图 4-5a 可知，微波功率的升高时维生素 C 含量减小，转换点含水率升高时维生素 C 含量增加，响应曲面由于转换点含水率水平变化发生了显著偏斜。通过这些现象可以发现，维生素 C 含量在转换点含水率的改变下发生的变化更大，在转换点含水率的范围为 61%~63%时，微波功率

范围为 400~500W 时，干制品的维生素 C 含量最高。图 4-5b 表明转换点含水率（X_1）与微波温度（X_3）对维生素 C 含量的影响，在微波温度固定时，维生素 C 含量与转换点含水率呈现正相关；转换点含水率一定时，维生素 C 含量与微波温度呈现负相关。



a.转换点含水率和微波功率对维生素 C 含量的影响

a.Effect of converted moisture content and microwave power on vitamin C content



b.转换点含水率和微波温度对维生素 C 含量的影响

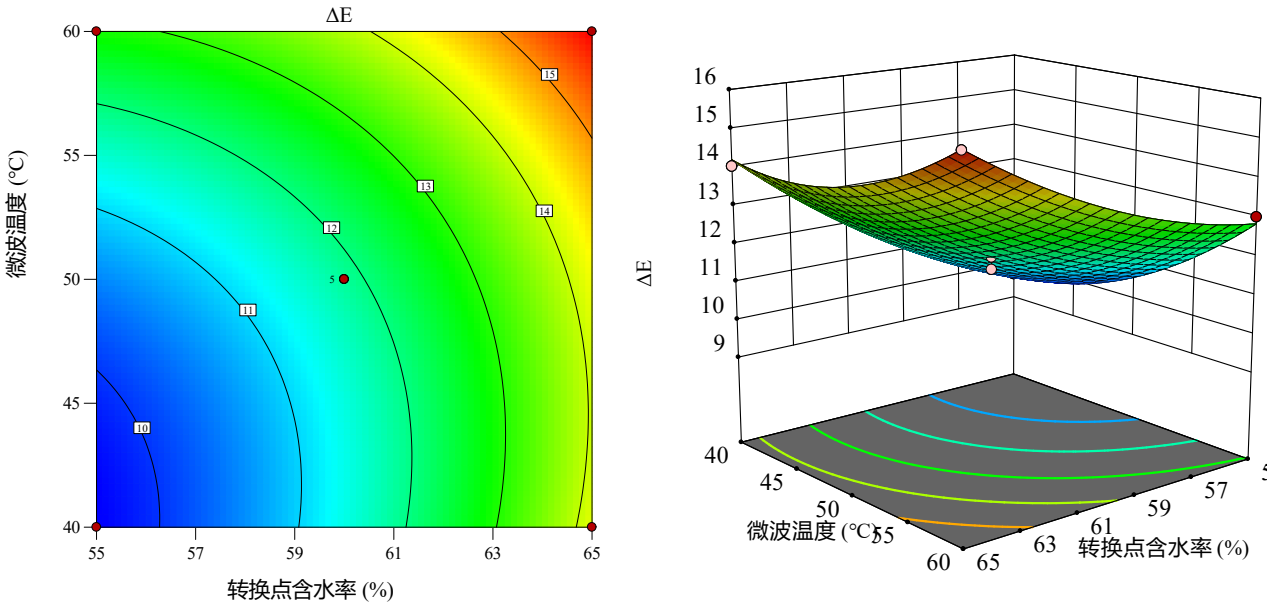
b.Effect of converted moisture content and microwave temperature on vitamin C content

图 4-5 交互作用对对维生素 C 含量的影响

Fig.4-5 The effect of interaction on vitamin C content

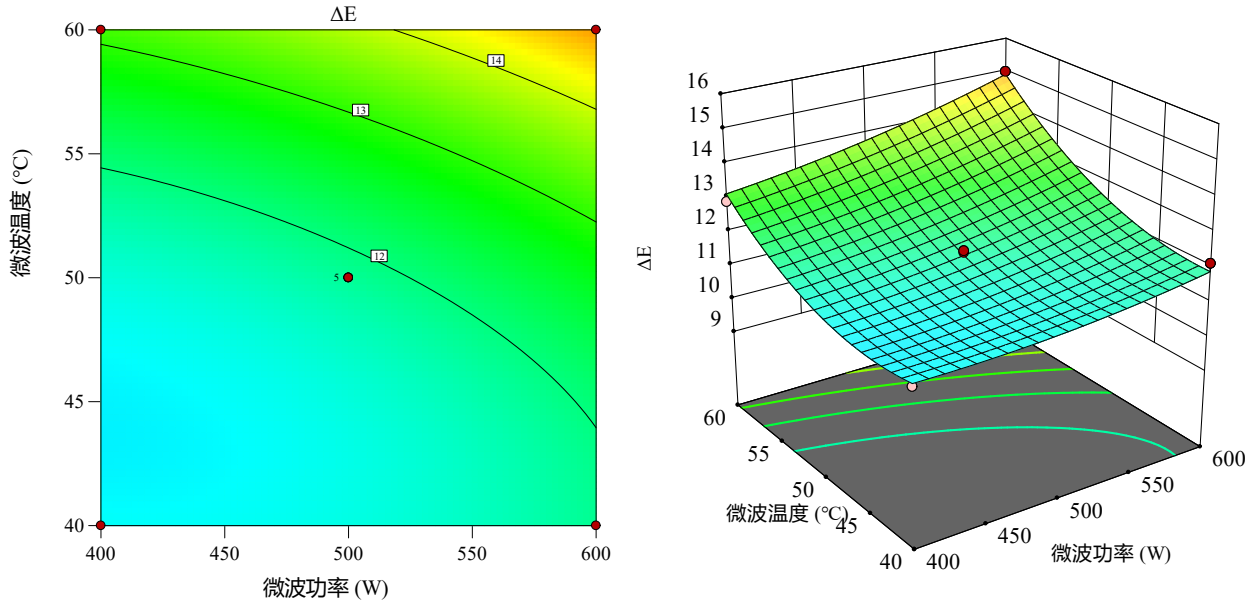
根据图 4-6a 可以看出，转换点含水率与微波功率对色差值ΔE 具有较强交互作用，其中在转换点含水率的变化下，响应曲面坡度较为陡峭，说明转换点含水率对色泽的

影响程度更大，ΔE 随转换点含水的升高而增大，随微波温度的减小而减小。图 4-6b 显示了微波功率与微波温度对色差值ΔE 的交互作用，微波功率及微波温度与ΔE 呈正相关，当微波功率与微波温度越低时，ΔE 越小，越有利于维持小白杏的原色，在微波功率接近 400W、微波温度接近 40℃时，小白杏干制品的色差最小。另外，图 4-6a 的等高线同图 4-6b 相比更为密集，表明 X_1X_3 的交互作用较 X_2X_3 的更强。



a.转换点含水率和微波温度对色差的影响

a.Effect of converted moisture content and microwave temperature on ΔE



b.微波功率和微波温度对色差的影响

b.Effect of microwave power and microwave temperature on ΔE

图 4-6 交互作用对色差的影响

Fig.4-6 The effect of interaction on ΔE

4.2.5 FD-MVD 干燥工艺参数优化及试验验证

（1）考察指标验证

表 4-4 所示为小白杏 FD-MVD 最优工艺参数，是通过 Design Expert 软件的优化程序得出，设定干燥时间、色差值ΔE 目标参数为“minimize”，维生素 C 含量目标参数为“maximize”。按照优化工艺参数进行 3 次重复试验，从表中可以看出，试验值与理论值差异较小，表明该模型可信度高。

表 4-4 响应面优化与对比验证结果

Table 4-4 Response surface optimization and comparative verification results

	转换点含水/%	微波功率/W	微波温度/℃	干燥时间/min	Vc 含量/(mg/100g)	色差值
理论参数	61.24%	400W	42	288.48	89.122	11.81
试验验证	61.14%	400W	42	286.02	88.559±0.37	11.38
相对误差		/		0.85%	0.63%	3.64%

（2）干燥动力学模型验证

通过第三章联合干燥动力学模型研究，得出了最适合描述联合干燥的降水过程的模型——Midilli 模型，并将最优干燥工艺条件下转换点含水率为 61%、微波功率为 400W、微波温度为 42℃进行小白杏联合干燥，将实验结果与 Midilli 模型的预测值作了对比，如图 4-7 所示。从图 4-7 可知，联合干燥水分比试验值与理论预测值结果基本一致，表明 Midilli 模型能较好地对小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥过程进行模拟，得到了干燥模型的 R^2=0.9980、χ^2=0.0024、*RMSE*=0.0106，表明拟合效果良好；得到的方程为 $MR=0.99546\exp(-0.2911t^{0.9672})+0.0177t$。在此基础上，利用所建立的数学模型，对小白杏联合干燥过程水分比 MR 与干燥时间 t 的变化规律进行预测，实现对干燥工艺参数和时间的调控，从而达到降低干燥能耗优化干燥品质的目的。

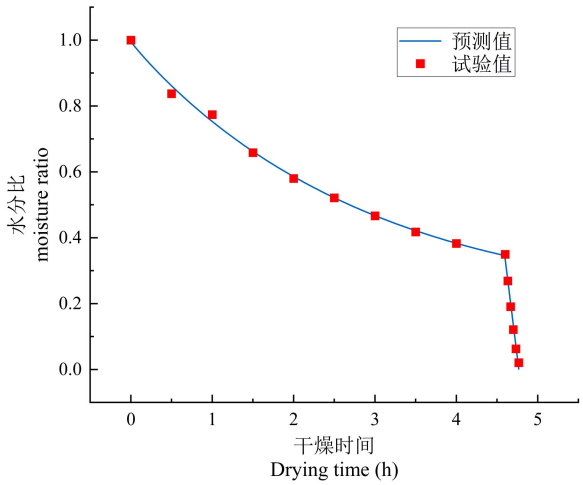


图 4-7 最优干燥工艺条件下 Midilli 干燥模型验证比较

Fig.4-7 Comparison of Midilli drying models under optimal drying conditions

4.3 本章小结

本章旨在优化小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥工艺，利用响应面方法中的Box-Behnken 中心组合设计试验，在单一变量试验结果的基础上进行工艺参数的优化，主要结论为：

（1）基于单因素试验，采取响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计试验进行优化小白杏 FD-MVD，建立了上述三个因素（转换点含水率、微波功率、微波温度）的回归模型，3 个回归模型的决定系数 R^2 分别为 0.9999、0.9795、0.9905，表示拟合效果均较佳。各影响因素对于干燥时间、维生素 C 含量及色差值ΔE 的影响程度大小为：转换点含水率>微波温度>微波功率。

（2）通过观察微波功率与转换点含水率的交互作用对干燥时间的响应曲面图，得出以下结论：当转换点含水率增加时，干燥时间会相应地延长；如果转换点含水率过低，对缩短干燥时间产生负面影响。从维生素 C 含量受转换点含水率与微波功率的交互作用的响应曲面图中得出，转换点含水率对于维生素 C 含量的影响更为显著。此外，进一步比较两者的等高线密度，可以看出，与微波功率和微波温度对色差值ΔE 的影响相比，转换点含水率与微波温度的交互作用更为明显。

（3）通过响应面优化的工艺参数为：转换点含水率 61%、微波功率 400W、干燥温度 42℃，该工艺下得到干燥时间 286.02min，相对误差为 0.85%，维生素 C 含量 88.559mg/100 g，相对误差为 0.63%，色差值 11.38，相对误差为 3.64%，通过对试验数据进行了验证，得到了与理论计算结果相近的结果，证明了利用该模型得到的最优工艺参数是可信的。并将优化工艺下的联合干燥水分比与第三章得到的最适宜的干燥动力学模型，Midilli 模型进行拟合，通过数据处理得到小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的数学模型 $MR=0.99546\exp(-0.2911t^{0.9672})+0.0177t$。

第 5 章 小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥品质分析

在前面的章节中，深入探讨了新鲜杏果的真空冷冻-微波真空联合干燥特性及其干燥动力学，并进行优化联合干燥工艺参数，得出最适宜的联合干燥工艺参数。为了考察联合干燥的营养、感官及理化品质，选择了四种果蔬干燥工艺，即红外干燥（Infrared Drying，IRD）、热风干燥（Hot Air Drying，HAD）、微波真空干燥（Microwave Vacuum Drying，MVD）、真空冷冻干燥（Freeze Drying，FD）这四种最常见且颇具代表性的干燥技术对小白杏进行干制加工，同最优真空冷冻-微波真空联合干燥（Freeze-Microwave vacuum drying，FD-MVD）工艺参数干燥下的小白杏干制品进行对比，对各干燥方法下产品的色泽、复水比、营养成分以及微观结构进行比较分析，进一步验证 FD-MVD 小白杏的可行性，确保效性和实用性，并以此作为生产过程的理论依据。

5.1 材料与方法

5.1.1 试验材料

试验材料与 2.1.1 所述材料相同。

5.1.2 试验试剂

试剂：草酸、L-抗坏血酸标准品、2,6-二氯靛酚钠盐、$NaHCO_3$、氢氧化钠、酚酞等试剂，均为国产分析纯试剂。

5.1.3 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）；中短波红外干燥箱(圣泰科有限公司，功率 0~2 kW)；Christ Alpha 1－2Ldplus 实验室真空冷冻干燥机（德国 Christ 真空冷冻干燥机有限公司）；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）；KQ5200DE 型数控超声波清洗器，昆山市超声仪器有限公司；CR－400 型色差仪（日本柯尼卡美能达公司）；SU8010 场发射扫描电子显微镜（日立 Hitachi 公司）；FW100 高速万能粉碎机（天津市泰斯特仪器有限公司）；电子天平（上海卓精电子科技有限公司，精确度 0.0001g ）。

5.1.4 试验方法

试验工艺流程：小白杏→挑选鲜果→冷藏(4℃冰柜，使水分分布均匀)→清洗→沥干→切分→去核→摆盘→干燥→冷却→装袋→成品→指标测定。

操作要点：将清洗好的小白杏用厨房纸去除切片表面多余的水，沿果缝切半，将果核取出，取(100±1)g 样品，备用。

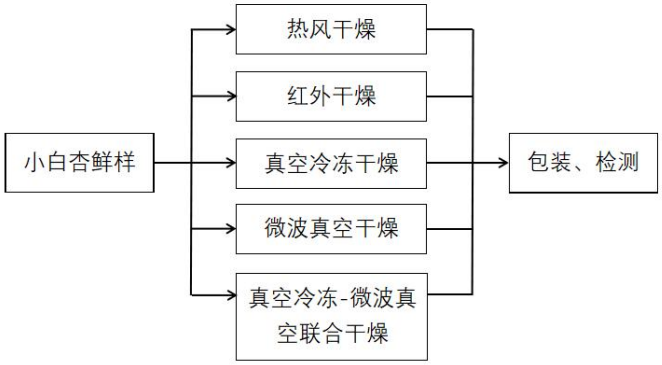


图 5-1 试验操作图

Fig.5-1 Test operating diagram

2.干燥机参数：在深入研究了国内外有关杏果干制工艺的文献资料后，选择了 4 种最具代表性的干燥技术。为了确保试验结果的一致性和可比性，在同样的干燥环境下，结合干燥机本身特性，拟将小白杏在相同条件下开展干燥实验，参数见表 5-1[16, 39, 76]。

表 5-1 干燥方法及干燥机参数设定

Table 5-1 Drying method and dryer parameter setting

干燥方法	参数设定
热风干燥	温度50℃，风速2.2 m / s
红外干燥	红外温度50℃，功率6.75 W / g
真空冷冻干燥	冷阱温度－40℃，加热板温度60℃，干燥室压力12Pa
微波真空干燥	微波温度50℃，功率5.00W / g
真空冷冻-微波真空联合干燥	冷阱温度-40℃， 微波温度42℃，功率4.00W / g ，转换点含水率 61%

5.1.5 试验参数测定

1.干基含水率

计算方法同 2.1.4 中式（2-1）。

2.水分比

计算方法同 2.1.4 中式（2-3）。

3.干燥速率

计算方法同 2.1.4 中式（2-4）。

4.色泽

采用 CM-700d 型分光测色仪，测定干燥过程中小白杏的色泽，记录 L^*、a^*、b^* 的值，为保证准确性，每个样品重复测定 6 次，取平均值。其中，L^*值表示小白杏的明亮度，a^*值表示小白杏的红绿值，b^*值表示小白杏的黄蓝值，ΔE 值表示干制小白杏与新鲜小白杏的色差。新鲜小白杏的色泽参数：L_0^*=60.02，a_0^*=6.81，b_0^*=46.77。ΔE 的计算参考 3.1.5 中式（3-1）。

5.复水比

每组称取 5g 干燥后的样品置于 5mL 烧杯中，将其转至于 80℃的水浴锅内浸泡，以 30min 为时间间隔进行称量，每次取出后将样品表面水分用滤纸吸干，称量重量，直至样品停止吸收水分，重量保持不变时停止。复水比（Rehydration Ratio, *RR*）计算公式如下[39]

$$RR = \frac{m_r}{m_d} \tag{5-1}$$

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.维生素 C 含量的测定

测定方法同 3.1.5 中维生素 C 含量的测定。

7.可滴定酸含量的测定

以 GB/T 12456-2008 执行，采用酸碱滴定法测量[77]，具体步骤为：

小白杏中可滴定酸的提取：将小白杏干制品用粉碎机磨制成粉，反应体系为：0.300g 杏粉+6mL 蒸馏水，在研钵中充分研磨使杏粉充分溶于蒸馏水，于 50mL 离心管内加入适量的研磨后的样液，置于离心机离心 10min，离心条件设置为 4000r/min，在锥形瓶中加入 1mL 离心上清液与 20mL 蒸馏水，后滴加两滴酚酞指示剂，摇晃至均匀混合，使用 0.1mol/L 的 NaOH 溶液滴定至混合溶液变为粉红色，记录 NaOH 溶液消耗的体积。

8.微观结构

从干燥成品中挑选出典型的样品，利用液氮速冻技术进行处理，并迅速折断以生成脆片横截面，用此样本进行观察。而后，将样本固定于涂抹碳导电胶的样品托上，之后在样本表面喷金，用电子显微镜扫描处理好的样本，通过多方位地观察找出各样本不同区块的组织结构，并将具有显著特征的照片保留下来，进行下一步分析[78]。

5.1.6 统计分析方法

数据统计分析采用 SPSS 27.0 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 2022 软件。

5.2 结果与分析

5.2.1 小白杏不同干燥方法下的色泽分析

色泽是杏干产品品质的重要指标之一，对商品价值有重要影响，小白杏干制品重点考察其亮度和黄色，故色差分析时重点关注 L^*和 b^*值[79]。不同干燥方式下色泽变化如图 5-2、图 5-3 所示，小白杏经干燥处理后，L^*值均降低，这表示干制品亮度同鲜样相比偏暗，其中 FD-MVD 样品的亮度 L^*最高，FD、MVD 次之，IRD 和 HAD 最低，表明联合干燥可以更好的保持小白杏的色泽。由于 IRD 和 HAD 干燥温度较高、时间较长，在美拉德反应和氧化反应下，使物料发生褐变，L^*值变化最明显[80]，HAD 时间比 IRD 更长，故 L^*值降低更明显。MVD 存在不均匀性，造成局部过热，产生焦化现象，导致有少量的黑色素[17]。5 种干燥方式下 FD 样品与 FD-MVD 样品△E 值相近，与鲜样保持差别较小，这是由于 FD 与 FD-MVD 干燥过程处于低温、低压、低氧气含量的环境中，抑制了褐变反应，使得样品△E 值小。相比之下，IRD 及 HAD 干燥过程中由于物料长时间暴露在热空气下，水分和酶的作用、氧化和较高温度引起的酶促褐变、非酶反应及热对色素的分解等因素，导致样品色泽变化较大[81]。综合以上结果可知，采用低温、真空的干燥方式能够更好地保持小白杏的颜色。



a. 热风干燥(HAD)
a. Hot air drying,(HAD)

b. 红外干燥(IRD)
b. Infrared drying,(IRD)

c. 真空冷冻干燥(FD)
c. Freeze drying,(FD)



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

e. 真空冷冻-微波真空联合干燥(FD-MVD)
e. Freeze－Microwave vacuum drying,(FD－MVD)

图 5-2 不同干燥方法的小白杏干制品
Fig.5-2 Different drying methods of Small white apricot dry products

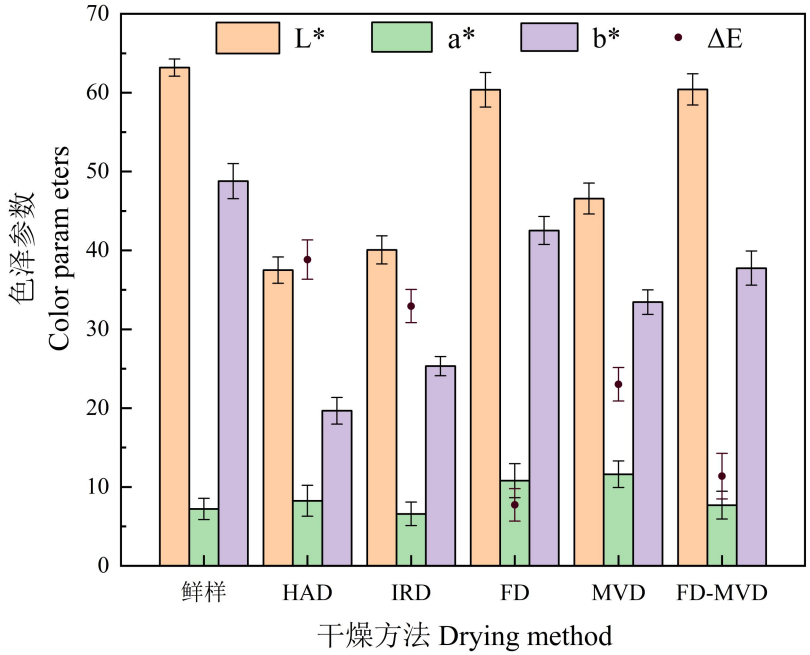


图 5-3 不同干燥方法下的小白杏色泽

Fig.5-3 Color of small white apricot under different drying methods

5.2.2 小白杏不同干燥方法下的复水分析

复水性可以评价干制品品质和干制方法优劣，反映物料由干燥引起的结构变化和细胞结构的破坏程度，复水比值越大，说明由干燥引起的结构变化和细胞结构的破坏程度越小，能够恢复到原鲜果状态程度越高，干燥效果越好[82]。不同干燥条件下小白杏的复水比如图 5-4 所示，经过 2h 浸泡后，小白杏干复水性存在差异，HAD、IRD、FD、MVD 和 FD-MVD 组产品复水比分别为 2.91、3.05、4.32、3.63、3.87，其中 FD 和 FD-MVD 组复水比显著高于其余三种干燥方式。这是因为冷冻过程水分直接升华中，形成的冰晶破坏了细胞壁以及导致组织结构形成多孔海绵状[83]。HAD 的复水比最小，因为干燥过程物料水分由内而外缓慢迁移，同时伴随溶质迁移，导致内部渗透压较低，且热能由外向内传递，物料表皮受热过度发生硬化，降低了复水速率和复水性能[84]；此外，HAD 样品组织结构变形收缩严重，也是限制复水速率和导致复水性能降低一个主要原因。IRD 与 HAD 相似，因为干燥时间相对较短，所以复水性比 HAD 更好。由于 MVD 的膨化作用使小白杏细胞内部孔隙增多增大，组织疏松，便于水分二次进入，增加了复水性[39]。综合上所述，FD 与 FD-MVD 组小白杏干制品的复水品质最佳。

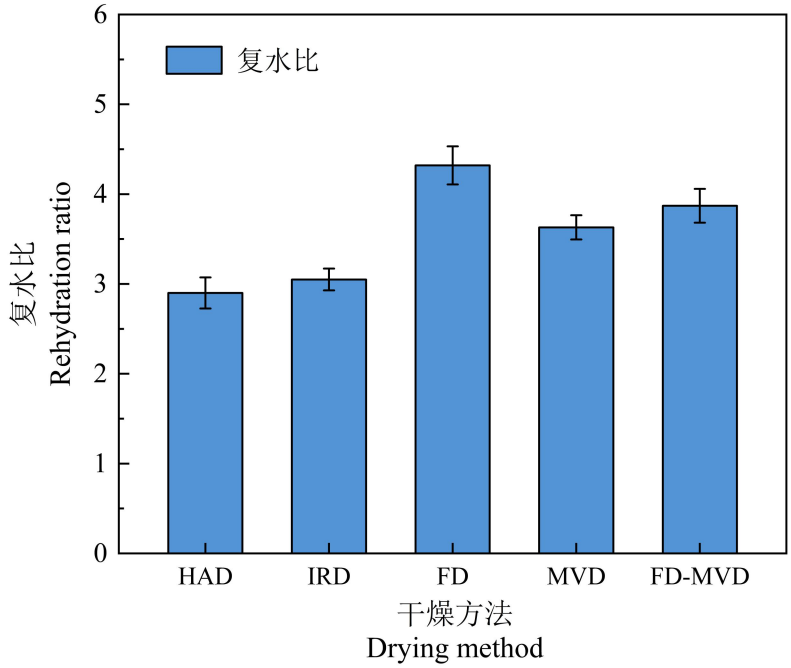


图 5-4 不同干燥方法下的小白杏复水比

Fig.5-4 Rehydration ratio of small white apricot under different drying methods

5.2.3 小白杏不同干燥方法下的营养成分分析

维生素 C 为水溶性营养物质，具有不稳定性，对光照、温度及氧气较敏感，容易分解[85]。由图 5-5 可知，FD 和 FD-MVD 组的小白杏干制品中的维生素 C 含量显著高于其他 3 组，这主要是由于 MVD、HAD 及 IRD 全程为热干燥，长时间的干燥过程使得维生素 C 酶促氧化和热降解[86]；而 MVD 下小白杏维生素 C 的含量相较于 HAD 及 IRD 较高，可能是因为其干燥时间短，维生素 C 与热空气接触时间短，损失较小，含量较高。由此可见，FD 和 FD-MVD 技术可更好地保留抗坏血酸含量，这是因为低温、低氧的环境更有利于维生素 C 的保留。

可滴定酸是果实品质的重要构成性状之一，对果蔬的口味、风味、加工性质等都具有重要的影响[87]。从图 5-5 可以看出，经过不同干燥方法制成的杏干，其可滴定酸含量的大小依次为：FD>FD-MVD>MVD>HAD>IRD。干燥过程中，热风干燥和红外干燥环境下的可滴定酸损失较严重，这是由于在长时间的干燥过程中，常压大风速环境下容易促使易挥发酸解离损失，导致可滴定酸含量降低；FD 后小白杏剩余的可滴定酸含量为 1.36%，而 FD-MVD 为 1.25%，比真空冷冻干燥稍低，但是联合干燥耗时远小于真空冷冻干燥，其干燥效果也远好于 MVD、HAD 及 IRD。

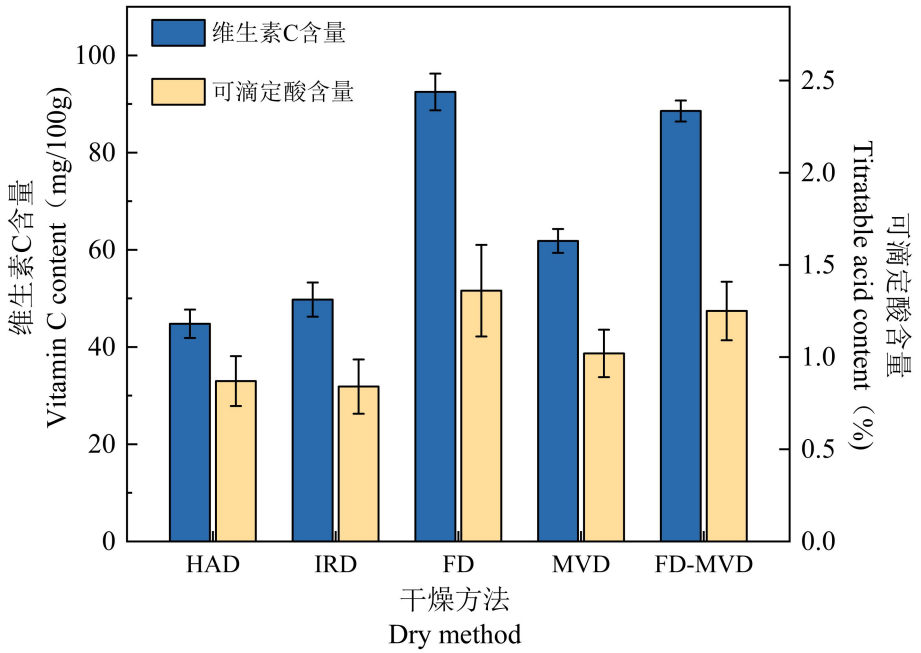
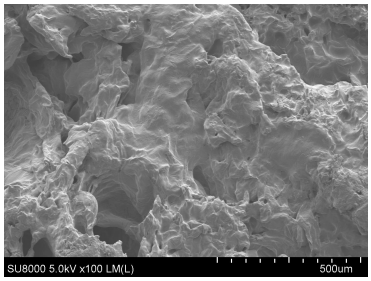


图 5-5 不同干燥方法下的小白杏维生素 C 和可滴定酸含量

Fig.5-5 Vitamin C and titrable acid contents of small white apricot under different drying methods

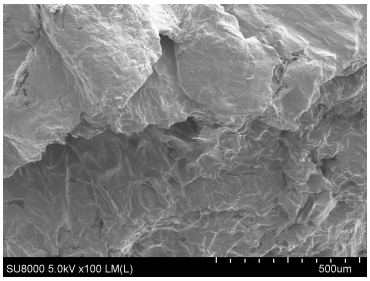
5.2.4 小白杏不同干燥方法下的微观结构分析

图 5-6 为通过不同干燥方法进行制干的小白杏干微观结构电镜扫描图。从图中可以看出，不同干燥方法干燥后的小白杏干组织微观结构存在显著差异，FD、MVD 及 FD-MVD 均出现较为均一的海绵多孔结构，但 MVD 与 FD-MVD 样品结构更为疏松，孔隙孔洞较多，具有良好的膨化效果。FD 与 MVD 样品在冻结过程形成了部分较大的冰晶，水分从冰晶状态下直接升华，出现了孔隙大且不均匀的现象，其中，FD-MVD 较 FD 孔隙更加明显且相对均匀，更能较好的保持小白杏的原貌[88]；MVD 样品表面具有很多细小的纹路，可能是由于微波真空干燥温度高、水分散失太快导致的表面细胞的破裂，表面形成了紧密收缩[89]；HAD 和 IRD 样品细胞形态发生了较大的变化，纤维结构有层叠现象，细胞壁结构坍塌，无孔隙结构，由于二者的干燥过程较为漫长，导致其表层呈现出硬化状态。这一观察结果也揭示了 HAD 和 IRD 样本中的细胞结构遭受了严重的损伤，表面出现皱缩，且收缩程度较大，得到的产品更硬。



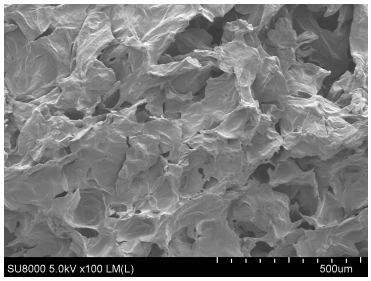
a. 热风干燥

a. Hot air drying, (HAD)



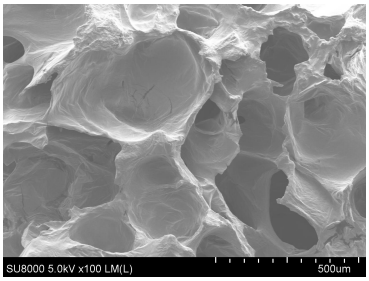
b. 红外干燥

b. Infrared drying, (IRD)



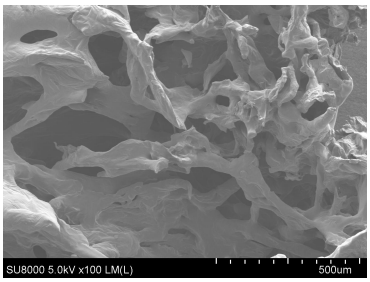
c. 真空冷冻干燥

c. Freeze drying, (FD)



d. 微波真空干燥

d. Microwave vacuum drying, (MVD)



e. 真空冷冻-微波真空联合干燥

e. Freeze – Microwave vacuum drying, (FD – MVD)

图 5-6 不同干燥方法下的小白杏微观结构

Fig.5-6 Microstructure of small white apricot under different drying methods

综上所述，发现 FD-MVD 的小白杏品质与 FD 相差不大，并且明显优于 MVD，这是由于 FD-MVD 能够充分利用发挥了 FD 和 MVD 两种干燥方式各自的优点，较好地解决 FD 后半段干燥过慢的问题，同时也减少了因 MVD 干燥引起的营养和颜色的流失，增加了干制品中维生素 C 和可滴定酸的含量，降低了产品色差值，增强了复水性。因此，FD-MVD 能在保证产品质量的前提下，缩短干燥时间，开创了一种新的作用于工业加工生产的小白杏联合干燥技术，为后续转为实体化生产提供了理论支撑。

5.3 本章小结

本章根据第三章所得的最优干燥工艺参数，对小白杏进行干燥，并对比了不同干燥方法（HAD、IRD、MVD、FD、FD-MVD）对小白杏的干燥品质（色泽、复水性、

维生素 C 及可滴定酸的含量、微观结构）的影响，显而易见，相较于其他干燥技术，联合干燥展现出了明显优势。联合干燥的品质在色泽、维生素 C 含量、可滴定酸含量、复水性方面稍逊于 FD，远好于 MVD、HAD 和 IRD。通过对比 5 种干燥技术下的小白杏干的电子显微镜图像，可以看出，FD-MVD 样品最佳，同时 FD-MVD 所需的干燥时间远远小于 FD，能耗较低，综上，FD-MVD 优于其他 4 种干燥方式，联合干燥方式的应用对提升小白杏的干燥速率、缩短干燥时间、提高干制品品质有重要意义，是一种值得大力发展的新型干燥方式。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

本文以新疆库车小白杏为原料，针对目前普遍存在的小白杏单一干燥的弊端，即干燥耗时长、干燥品质欠佳，本研究首先提出一种可以用于小白杏的干燥技术——真空冷冻-微波真空联合干燥（FD-MVD），深入探讨研究了不同的转换点含水率、微波功率及微波温度对小白杏联合干燥特性与干燥品质的影响，并且在单因素试验的基础上，对小白杏的 FD-MVD 工艺参数进行了响应曲面设计优化。其次，通过与 12 种常用的干燥模型进行联合干燥的水分比曲线拟合分析，选取能够较好的描述小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的模型，并得出干燥模型转化为干燥参数表达公式。最后，通过对优化工艺参数下得到的干制品品质进行分析，将联合干燥下的小白杏与常用果蔬干燥方法下的小白杏干制品进行对比，经过深入的研究与测试，确认了此联合干燥技术在提升干燥产品的品质以及减少干燥所需时间方面的显著效果。得到的主要研究结论如下：

（1）经过深入研究小白杏在不同的干燥条件（转换点含水率、微波功率以及微波温度）下的 FD-MVD 干燥特性。具体来说，随着转换点含水率的降低，小白杏 FD-MVD 的干燥时间呈现出增长的趋势，并且此过程中的干燥时间长度主要受到 FD 阶段的影响。当转换点含水率从 65%降到 45%时，干燥时间也相应地从 3.67h 增至 7.18h，其中 FD 阶段耗时分别是 3.50、7.10h，MVD 阶段耗时分别是 0.17、0.08h；FD 阶段的水分有效扩散系数 D_{eff} 范围在 $2.28\times10^{-9}m^2/s$ 至 $2.52\times10^{-9}m^2/s$ 之间，而 MVD 阶段的 D_{eff} 值则在 $1.83\times10^{-7}m^2/s$ 至 $2.59\times10^{-7}m^2/s$ 之间。随着微波功率的提升，联合干燥的时间呈现出降低的趋势，MVD 阶段的干燥速率与微波功率呈现正相关，当微波功率从 300W 提高到 700W 时，MVD 初始点的干燥速率从 0.81g/(g·h)跃升至 2.03g/(g·h)；与此同时，水分有效扩散系数也随之上升，从 $1.92\times10^{-7}m^2/s$ 增至 $3.93\times10^{-7}m^2/s$。现微波温度的变化也会影响干燥过程。随着微波温度的升高，水分比下降的速度加快，从而导致干燥时间的缩短。MVD 阶段的干燥速率随微波温度的增加而增加，在微波温度为 40℃时，干燥速率的下降变得平缓，并且在 MVD 初始点，干燥速率最低（1.0345g/(g·h)）；其水分有效扩散系数与微波温度为正相关。当温度由 40℃上升到 60℃时，其值则由 $2.32\times10^{-7}m^2/s$ 增加至 $2.81\times10^{-7}m^2/s$。

（2）基于单因素试验，采取响应面法中的 Box-Behnken 中心组合设计试验进行优化小白杏 FD-MVD，建立了上述三个因素（转换点含水率、微波功率、微波温度）

的回归模型，3 个回归模型拟合效果根据方差分析显示均较佳。各影响因素对于干燥时间、维生素 C 含量及色差值ΔE 的影响程度大小为：转换点含水率>微波温度>微波功率。并通过响应曲面优化法得到小白杏 FD-MVD 的最优工艺参数即：转换点含水率为 61%、微波功率为 400W、微波温度为 42℃。将此参数下的实际试验值与理论结果进行分析比较，其结果较为一致，表示该回归模型是可靠的。

（3）通过计算不同转换点含水率、微波功率、微波温度干燥条件下小白杏联合干燥过程中的水分比，拟合比较 12 种常用的干燥模型的水分比曲线，选取决定系数 R^2、离差平方χ^2与均方根误差 *RMSE* 来评价模型的拟合精度，发现 Midilli 模型最适合描述不同干燥条件下小白杏 FD-MVD 的降水过程，通过数据处理得到小白杏真空冷冻-微波真空联合干燥的数学模型 $MR=0.99546\exp(-0.2911t^{0.9672})+0.0177t$，可用于预测小白杏联合干燥过程失水率的变化过程。

（4）对比了小白杏在不同干燥方法下（HAD、IRD、MVD、FD、FD-MVD）的干燥品质（色泽、复水性、维生素 C 及可滴定酸的含量、微观结构），就色泽、维生素 C 含量、可滴定酸含量、复水性而言，联合干燥的品质仅次于真空冷冻干燥，远好于微波真空干燥、热风干燥和红外干燥。从这 5 种不同干燥方式所得小白杏干制品的电镜扫描图片可以看出，FD-MVD 样品最佳，同时 FD-MVD 所需的干燥时间远远小于 FD。综上，真空冷冻-微波真空联合干燥比其他干燥方式具有明显的优势，对提升小白杏的干燥速率、缩短干燥时间、提高干制品品质有重要意义。

6.2 展望

本文提出一种小白杏干制的新工艺，将真空冷冻-微波真空联合干燥应用至小白杏干制品加工中，能够拥有较短干燥时间的同时能够获得高品质的小白杏干制品。尽管研究工作已取得了一定的进展，但是由于时间限制和设备技术的局限性，本研究的工作还存在不足之处，仍需进一步完善和优化：

（1）在针对工艺优化的试验过程中，已确定了三个影响因素（转换点含水率、微波功率、微波温度）和三个评估指标（干燥时间、维生素 C 含量、色差），未来研究可以考虑引入更多的变量，例如微波真空度的变化，以全面评估各种品质和营养成分的状况。可以进一步提升干制食品的品质，并有效地缩短干燥过程所需的时间；

（2）在小白杏联合干燥品质研究方面，仅考虑对比了四种单一干燥方法对小白杏品质的影响，后续应进一步对比研究其他干燥方法以及多种联合干燥，为小白杏干制加工的提质增效提供更完善的技术和数据支撑。

参考文献

[1] 张加延.中国果树志·杏卷[J].园艺学报, 2004, 31(1)1.

[2] 李自芹,杨慧,李文绮,等.新疆鲜杏保鲜技术研究现状[J].农产品加工,2020(20):6.DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2020.10.065.

[3] 靳本太,张怡,张爱萍.库车市小白杏产业的文献综述研究[J].中国市场, 2023(13):66-69.

[4] 刘金秀,贺小伟,罗华平,等.基于高光谱成像技术的小白杏成熟度判别模型[J].食品研究与开发, 2022(015):043.

[5] 李硕,王娟,尼格尔热依·亚迪卡尔,等. 不同品种杏果实不同发育期功能性成分变化规律[J]. 新疆农业科学,2023,60(5):1200-1207. DOI:10.6048/j.issn.1001-4330.2023.05.019.

[6] Ali S , Masud T , Abbasi K S .Physico-chemical characteristics of apricot (Prunus armeniaca L.) grown in Northern Areas of Pakistan[J].Scientia Horticulturae, 2011, 130(2):386-392.DOI:10.1016/j.scienta.2011.05.040.

[7] Hussain P R , Meena R S , Dar M A , et al.Gamma irradiation of sun-dried apricots (Prunus armeniaca L.) for quality maintenance and quarantine purposes[J].Radiation Physics and Chemistry, 2011, 80(7):817-827.DOI:10.1016/j.radphyschem.2011.02.029.

[8] 何欢. 外源褪黑素处理减轻杏果实冷害作用的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.

[9] 温昕晔.一氧化氮对小白杏冷藏特性及有机酸代谢相关基因表达的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.DOI:10.7666/d.Y2886952.

[10] 王旭光,茹先古丽·买买提依明,徐晓培,等.库车小白杏混菌乳酸发酵工艺优化及其发酵动力学模型[J].食品工业科技, 2021.DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020070368.

[11] 王庆惠,李忠新,买合木江,等.新疆杏制干设备现状与发展建议[J].农产品加工(学刊),2014(3):77-79.DOI:10.3969/jissn.1671-9646(X).2014.03.053.

[12] 李洁,胡灿,丁羽,等.新疆杏类果品干燥技术研究发展动态[J].现代农业装备,2021.DOI:10.3969/j.issn.1673-2154.2021.03.002.

[13] 刘家璇,彭孟晨,杨雪洁,等.射频预处理对杏果热风干燥特性及营养成分的影响[J].食品与发酵工业, 2019, 45(3):7.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.017509.

[14] 吴雨豪,吕瑞玲,周建伟等.真空冷冻干燥技术在果蔬类食品加工中的应用现状[J].包装工程,2023,44(07):85-95.DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.010

[15] 韩旭,董京磊,宫俊杰,等.果蔬干燥技术的研究进展[J].中国食物与营养, 2020, 26(9):4.

[16]闫圣坤,李忠新,王庆惠,et al.热风干燥过程中小白杏色泽的变化及其动力学研究[J].食品与机械, 2017, 33(2):7.DOI:CNKI:SUN:SPJX.0.2017-02-009.

[17]赵红霞,王应强,马玉荷,等.微波干燥条件对杏脯干燥特性与品质的影响[J].食品与机械, 2023, 39(4):123-129.

[18]苏丹,李树君,赵凤敏,等.农产品联合干燥技术的研究进展[J].农机化研究, 2014, 36(11):5.DOI:10.3969/j.issn.1003-188X.2014.11.055.

[19]苏克军李海峰.果蔬真空冷冻联合干燥技术的研究进展[J].食品安全导刊, 2022(32):189-192.

[20]李辉,袁芳,林河通,等.食品微波真空干燥技术研究进展[J].包装与食品机械, 2011, 29(1):5.DOI:10.3969/j.issn.1005-1295.2011.01.012.

[21]Monteiro, Ricardo LemosLink, Jade VaraschimTribuzi, GiustinoCarciofi, Bruno A. M.Laurindo, Joao Borges.Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices[J].LWT-Food Science & Technology, 2018, 96.

[22]过利敏,张谦,赵晓梅,等.优质杏干的太阳能干燥特点及其工艺研究[J].新疆农业科学,2008,45 (06):1102-1109.

[23]肖红伟,张世湘,白竣文,等.杏子的气体射流冲击干燥特性[J].农业工程学报, 2010(7):26.

[24]王平.杏子干燥工艺与烘干房高效利用研究[J].新疆农业科技, 2017(4):2.DOI:10.3969/j.issn.1007-3574.2017.04.031.

[25]张谦,过利敏,邹淑萍,等.串联式 5HT-2 农副产品太阳能干燥装置性能研究[J].食品与机械, 2012(3):3.DOI:10.3969/j.issn.1003-5788.2012.03.048.

[26]徐麟,蒋涛,冯建荣,等.不同太阳能干燥设备处理对杏干品质的影响[J].保鲜与加工, 2012, 12(3):3.DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2012.03.009.

[27]杨瑞云,王瑞祥,张振涛,等.小白杏热泵干燥特性和褐变研究[J].北京建筑工程学院学报, 2013, 29(4):4.DOI:10.3969/j.issn.1004-6011.2013.04.006.

[28]赵红霞,王应强,温建华,等.干燥方法对杏肉全粉品质及抗氧化活性的影响[J].食品与机械, 2018, 034(009):201-205,220.

[29]Topcam H , Gogus F , Ozbek H N ,et al.Hot air-assisted radio frequency drying of apricots: Mathematical modeling study for process design[J].Journal of Food Science, 2022.DOI:10.1111/1750-3841.16021.

[30]Kim JH, Kim JH, Eun JB. Optimization of spray drying process of Japanese apricot (Prunus mume Sieb. et Zucc.) juice powder using nondigestible maltodextrin by response surface methodology (RSM)[J].Food Sci Technol. 2023 Mar;60(3):868-878. doi: 10.1007/s13197-020-04917-1.

[31]Igual M , Garcia-Martinez E , Martin-Esparza M E , et al.Effect of processing on the drying kinetics and functional value of dried apricot[J].Food Research International, 2012, 47(2):284-290.DOI:10.1016/j.foodres.2011.07.019.

[32]Abdallah W, Kamal M R. Influence of process variables on physical characteristics of spray freeze dried cellulose nanocrystals[J]. Cellulose, 2018, 25 (10): 5711 -5730. DOI: 10.1007/s10570-018-1975-0.

[33]黄忠闯,李全阳,姚春杰,等.热风干燥和真空冷冻干燥芒果品质的比较研究[J].农业机械, 2011(18):5.DOI:CNKI:SUN:NYJI.0.2011-26-041.

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

[35]Quispe-Fuentes I , Antonio Vega-Gálvez, Aranda M .Evaluation of phenolic profiles and antioxidant capacity of Maqui (Aristotelia chilensis) berries and their relationships to drying methods[J].Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(11).DOI:10.1002/jsfa.8938.

[36]Wang L, Wen H, Yang N, Li H. Effect of vacuum freeze drying and hot air drying on dried mulberry fruit quality[J].PLoS One, 2023, 18(6):e0283303. DOI:10.1371/journal.pone.0283303.

[37]吴雨豪,吕瑞玲,周建伟,等. 真空冷冻干燥技术在果蔬类食品加工中的应用现状[J]. 包装工程,2023,44(7):85-95. DOI:10.19554/j.cnki.1001-35.

[38]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:石河子大学,2022.

[39]郭俊杰. 哈密杏微波真空干燥特性及工艺优化研究[D]. 晋中:山西农业大学,2020.

[40]王亚娟,张凤娟,滕建文,韦保耀,王勤志.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.

[41] Sigit Uji M , Yudi P , Tabkrich K , et al.Effect of blanching pretreatment and microwave-vacuum drying on drying kinetics and physicochemical properties of purple-fleshed sweet potato[J].Journal of food science and technology, 2021, 58(8):2884-2895.DOI:10.1007/s13197-020-04789-5.

[42]A X X , A L Z , A Y F , et al.Vacuum pulsation drying of okra (Abelmoschus esculentus L. Moench): Better retention of the quality characteristics by flat sweep frequency and pulsed ultrasound pretreatment[J].Food Chemistry, 2020, 326.DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127026.

[43]邢晓凡,刘浩楠,姚飞,等. 不同干燥方式对黄桃果干品质的影响[J]. 食品工业科技,2023,44(24):327-333. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.20230

[44]肖曼玉,张秀玲,刘明华,等.响应面法优化青椒微波-真空冷冻联合干燥工艺及品质分析[J].现代食品科技[2023-12-26].DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0513.

[45]黄略略,乔方,叶晓梦等.不同干燥方式对铁棍山药品质的影响[J].食品与生物技术学报,2014,33(11):1210-1215.

[46]Jiang N , Liu C , Li D , et al.Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption[J].LWT - Food Science and Technology, 2017, 82:216-226.DOI:10.1016/j.lwt.2017.04.015.

[47]谭舒丹.预处理对沙棘热风-微波真空联合干燥特性及品质的影响[D].石河子:石河子大学,2023.DOI:10.27332/d.cnki.gshzu.2023.000115.

[48]叶晓梦.铁棍山药冻干一微波真空联合干燥工艺研究[D].石河子:石河子大学,2014.

[49]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.

[50]孙静儒.平菇微波-真空冷冻干燥工艺研究及其脆皮的研制[D].西安:陕西师范大学,2019.

[51]杨爱金,刘璇,毕金峰,等.食品干燥过程中水分扩散特性的研究进展[J].食品与机械, 2012(5):4.DOI:10.3969/j.issn.1003-5788.2012.05.065.

[52]江蓉.多孔玉米淀粉的制备与吸附性研究[J].安徽农业科学, 2020, 48(19):4.DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.19.045.

[53]黄博,李冠,罗少梅,等.菠萝片微波真空干燥特性及动力学模型研究[J].安徽农业科学, 2022(010):050.

[54]朱金星.草莓组合干燥工艺及品质变化研究[D].泰安:山东农业大学,2022.

[55]汤小红,李程懿,黄丹,等.油茶籽微波真空干燥特性[J].中南林业科技大学学报,2021,41(06):139-146+166.

[56]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(8):7.

[57]杨玲,陈建,杨屹立,等.甘蓝型油菜籽热风干燥特性及其数学模型[J].现代食品科技, 2014, 030(008):144-150.

[58]廉苗苗.猕猴桃冻干-真空微波联合干燥及其益生菌浸渍干制品工艺优化[D].洛阳:河南科技大学,2020.

[59]卿果,徐剑,缪艳燕,等.枸杞浸膏微波真空干燥特性及干燥动力学模型研究[J].食品工业科技, 2023, 44(5):8.DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022040215.

[60]余虹露.百合微波真空干燥特性及工艺优化研究[D].长沙:湖南农业大学,2020.DOI:10.27136/d.cnki.ghunu.2020.000753.

[61]Zarein M, Samadi S H, Ghobadian B.Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices[J].Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2015, 14(01):41-47.

[62]宋树杰,王蒙.熟化紫薯片微波干燥特性及数学模型[J].食品与发酵工业, 2020, 46(2):9.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021979.

[63]宋树杰,黄雪,郭玉蓉.基于温度控制的猕猴桃片微波真空干燥特性研究[J].食品与机械, 2021, 37(10):124-132,244.

[64]何方健,李静,刘明宝,等.山楂微波干燥特性及含水率预测[J].食品工业科技, 2021, 42(12):7.DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020090098.

[65]代建武,杨升霖,王杰,温梦达,付琪其,黄欢.微波真空干燥对香蕉片干燥特性及品质的影响[J].农业机械学报, 2020, 51(S01):8.

[66]Putranto A , Chen X D .A successful comparison between a non-invasive measurement of local profiles during drying of a highly shrinkable food material (eggplant) and the spatial reaction engineering approach[J].Journal of Food Engineering, 2018, 235(OCT.):23-31.DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.04.024.

[67]李丽霞,周杰,张付杰,等.宝珠梨微波热风耦合干燥工艺优化及动力学模型研究[J].包装与食品机械, 2022, 40(1):8.

[68]程慧.香菇热泵--真空联合干燥工艺优化及等级分选研究[D].南京:南京农业大学,2024.

[69]任广跃,刘军雷,刘文超,等.香椿芽热泵式冷风干燥模型及干燥品质[J].食品科学, 2016, 37(23):7.DOI:10.7506/spkx1002-6630-201623003.

[70]Alibas I, Yilmaz A, Asik B B, et al.Influence of drying methods on the nutrients, protein content and vitamin profile of basil leaves[J].Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96:103758.

[71]李润丰,赵希艳,高亚弟.2,6-二氯靛酚反滴定法测定红色果蔬中还原型 VC[J].营养学报, 2012, 34(5):3.DOI:CNKI:SUN:YYXX.0.2012-05-025.

[72]Karim K, F. N A. Comparative study of pretreatment on microwave drying of Gala apples (Malus pumila): Effect of blanching, elect field and freezing[J]. LWT, 2022, 165.

[73]毕金峰,邵春霖,陈芹芹,等.蓝莓热风-微波真空联合干燥工艺研究[J].中国食品学报, 2014(10):9.DOI:CNKI:SUN:ZGSP.0.2014-10-022.

[74]王庆惠,杨嘉鹏,杨忠强.基于 Box-Behnken 响应面法优化杏子干燥工艺[J].新疆农业科学, 2021, 58(11):8.DOI:10.6048/j.issn.1001-4330.2021.11.017.

[75]刘帮迪,吕晓龙,王彩霞,等.高温短时热空气处理促进甘薯愈伤的工艺优化[J].农业工程学报, 2020, 36(19):10.DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2020.19.036.

[76]靳力为,任广跃,段续,等.超声波协同作用对真空冻干杏脱水及其品质的影响[J].食品与发酵工业, 2020, 46(6):8.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022668.

[77]朱玉珍.食品中总酸的测定方法确认报告[J].科学与财富, 2018.DOI:10.3969/j.issn.1671-2226.2018.09.144.

[78]唐小闲,陈海荣,任爱清,等.不同干燥方法对三华李片干燥特性及营养成分的影响[J].食品研究与开发, 2022, 43(24):42-50.

[79]王庆惠,李忠新,闫圣坤,等.干燥工艺对杏干燥特性及色泽变化影响[J].中国农业科技导报, 2018, 20(1):7.DOI:CNKI:SUN:NKDB.0.2018-01-010.

[80]刘含龙,万金庆,杨帆,张毅,高欣月,童年.不同干燥方式对草菇切片品质的影响[J].食品与发酵工业[2024-01-04].DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025622.

[81]吕莹,陈芹芹,李旋,等. 干燥对果蔬加工色泽影响的研究进展[J]. 食品科学,2023,44(13):368-377. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220802-022.

[82]郭建业,张艳红,张岚,等.草莓片真空冷冻干燥工艺研究[J].农产品加工,2021.DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2021.04.007.

[83]陈雪,李古阳,高超,等.不同干燥方式对海棠果果片品质的影响[J].粮食与油脂,2022(006):035.

[84]罗东升,王梅,朱玉丽,et al.不同干燥技术对鲜切枣片品质的影响[J].食品工业科技,2017, 38(17):8.DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.17.018.

[85]Zia M P , Alibas I .Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro bioaccessibility of blueberry fruits[J].Food Bioscience, 2021(42-):42.DOI:10.1016/j.fbio.2021.101179.

[86]Wang, Jun, Mujumdar, et al.High-humidity hot air impingement blanching alters texture, cell-wall polysaccharides, water status and distribution of seedless grape[J].Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2018, 194:9-17.

[87]胡晶鼎,杨洁,葛城,等.不同干燥工艺枇杷果干的品质比较分析[J].食品界,2022(1):108-110.

[88]金鑫,段续,任广跃等.不同干燥方式对无花果干燥特性及品质的影响[J].食品与发酵工业,2024:1-11.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035519.

[89]Ando Y, Hagiwara S, Nabetani H, et al. Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 100: 294-299.

致谢

行文至此，落笔为终，这一年我刚满 24 岁，而我 19 年的学生生涯也就此告一段落。岁月不居，时节如流，读研的时光很快，好像昨日还是 21 年秋，转眼以至 24 年春。这三年中，我与许多人相遇，与许多人告别，也品味到了读研期间的快乐、烦闷、迷茫、收获，也会有许多遗憾，正是这些种种带给了我成长，也在这里向给予我帮助带给我温暖的人表达真挚的感谢。

生逢盛世，与有荣焉。感谢党和国家给我们提供了和平舒适的学习环境和平等接受教育的机会。让我可以安心完成学业，逐渐成长为一名有知识、有理想的学生。

桃李不言，下自成蹊。感谢石河子大学，提供的求学氛围让我学到了丰富的专业知识，也找到了今后努力的目标，深刻理解了“明德正行，博学多能”的校训，在今后的学习工作生活中，我也会一直谨记，不忘初心，砥砺前行。

涓涓师恩，铭记于心。由衷地感谢我的导师张茜老师及杨旭海老师在三年的研究生学习生活中对我的教导，老师们不拘一格地传达出自己广博的见识与艰深的思索，不仅在学术上给予我耐心的指导，也在生活上也给予我无微不至的关怀。从论文选题、开题到试验安排以及论文撰写等环节，老师无数次悉心的指导，给予了宝贵的意见和帮助，让我的论文得以顺利完成。再次向恩师致以最诚挚的谢意！感谢从开题到中期到预答辩到最终答辩中遇到的所有专家老师们，给予我宝贵的指导和帮助，丰富了我的论文，愿老师们桃李满园，学术长青。

父母之爱子，则为之计深远。感谢我的家人，是我强大的精神支柱，也给了我无限的爱与包容。感谢我的母亲，是她的强大、独立、支持、温暖、包容成就了今天的我，哪怕不认同、不理解，却一直充当着让我有坚持做自己的勇气与后盾；在漫漫求学路中我无助、挣扎、内耗的时候，安抚我的心灵使我得以平静。感谢我的父亲，一直在背后默默地守护，我想，沉默无言也是一种对我的支持。是我的家人让我能不断汲取力量，使我自由无据的成长，让我感受到爱，教会我什么是爱，是我存在于这世间的最大底气。

愿岁并谢，与长友兮。我时长感觉自己很幸运，遇到的朋友都是如此的真诚、美好，在枯燥艰苦的科研生活中，带给我的世界一抹亮色。感谢我最好的朋友苏琳，是她在潜移默化中改变了我，才让我的内心更自信，更强大；在遇到所有困难时，都能给予我力量或指引我方向；让我能将所有足与外人不足与外人说的话都有了倾诉的地方，温暖着我，坚定着我。感谢在研期间遇到的师兄师姐与好朋友们，在我的生活上、学习上都给予我莫大的帮助，是他们陪伴着我，包容着我，让我觉得所在的环境是温

暖的。年年遇人，时间匆匆，不管是陪我度过成长的阵痛、见证过我数次转变仍不离不弃的挚友，还是每个新的环境中不断遇到的新的缘分，我都珍而重之，铭记于心。

最后，感谢独一无二的自己，虽平庸但又真挚热烈地去完成了每一件想要做的，经历的每一件事也都在我的生命中留痕。虽有遗憾，但小满即万全，愿能永远在自己的节奏里前行，在自己所追求的生活中熠熠生辉。

时间具有一维性，一去不复返。感恩所有经历，感谢所有遇见，惟愿来日之路光明灿烂！

何睿颖

2024 年 3 月于石河子大学

作者简介

何睿颖，女，汉族，中共预备党员，生于 2000 年 1 月，籍贯陕西省西安市。2017 年 9 月~2021 年 6 月，就读于辽宁工业大学汽车与交通工程学院交通运输专业，获工学学士学位；2021 年 9 月~2024 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，从事农产品加工方向研究，期间加入中国共产党。

在学期间参与的研究项目

1. 主要参与了沙棘采后保鲜干燥技术研究与功能产品开发及提质增效（项目编号 2022134493 ），自治区重点研发任务专项的研究工作。

2. 参与了基于光伏发电膜加热烘房辣椒干燥关键技术研究与示范的研究工作。

在学期间发表的专利

杨旭海,周文皓,刘信君,李育峰,张茜,戚小琛,谭舒丹,**何睿颖**,马文宏.一种农产品分拣机械臂[P].CN114030005A,2022-02-11.

获奖情况

1.2021 年获得研究生三等学业奖学金；

2.2022 年获得优秀共青团干部；

3.2022 年获得优秀学生干部

4.2022 年获得校级“三下乡”优秀个人；

5.2023 年获得优秀学生干部。

石河子大学硕士研究生学位论文

导师评阅表

研究生姓名	何睿颖	学制	三年
专业	机械	研究方向	农业机械化工程

学术评语:

该学位论文选题来源于实际，系所属专业学位类别的研究范畴，根据新疆小白杏干制品加工的实际需求，为探寻最佳干燥小白杏的技术途径，将真空冷冻-微波真空干燥方法应用于小白杏的干制加工，分析其干燥特性及理化性质，优化工艺参数，并建立小白杏联合干燥水分比曲线模型，最后与单一干燥方法的杏干制品进行对比，验证明确了真空冷冻-微波真空干燥的优越性，研究工作对于小白杏干制加工提供一种新的联合干燥技术和理论依据。文献资料较为丰富、新颖，并具有较好的归纳条理性；论文选题正确、技术路线合理、研究方法正确；论文撰写层次分明、逻辑性强、语言表述清楚，写作规范，工作量较为饱满，研究结果具有一定的参考价值，有一定的经济和社会效益；该学位论文达到专业学位硕士论文水平要求。

指导教师签字:张苗

2024 年 5 月 15 日