

变温工艺对澳洲坚果带壳果干燥特性及品质的影响

黄克昌¹, 王雪敏^{2,3}, 胡明东^{2,3}, 姜家泰^{2,3}, 郭刚军^{1*}

(1. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100; 2. 云南迪思企业集团坚果有限公司, 云南盈江 679300; 3. 德宏迪思坚果开发有限公司, 云南芒市 678400)

[摘要]为探究分段式热泵变温干燥工艺对澳洲坚果带壳果干燥特性及品质的影响, 设置4种变温工艺程序(30→33→37→42→45℃、33→37→42→45→50℃、35→38→42→45→50℃及37→39→41→43→45℃), 通过测定分析果仁干基含水率、干燥速率、裂果率、黏壳率、油果率、色泽参数(L^* 、 a^* 、 b^*)及质构(硬度、破裂力、剪切力、咀嚼性)指标, 以筛选最优干燥工艺参数。结果显示: 35→38→42→45→50℃工艺的干燥速率在35~45℃阶段为0.44~0.29 g/(g·h), 显著高于其他工艺, 总干燥时长仅120 h, 最终干基含水率降至2.91%; 该工艺的裂果率4.33%和黏壳率4.67%, 均为最低, 油果率为0; 果仁色泽保持最佳, 总色差值 ΔE 为9.44, 硬度147.07 N和咀嚼性24.74 N, 均为最低, 果仁质地酥脆、口感优良。研究得出35→38→42→45→50℃为最优变温干燥工艺, 可在保证低裂果率、无油果、良好色泽和质构的前提下, 显著缩短干燥时长, 提升加工效率与产品品质。

[关键词]澳洲坚果; 带壳果; 干燥; 变温工艺; 品质

中图分类号: TS255.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2026)04-0050-07

Effects of Variable Temperature Drying Technology on Drying Characteristics and Quality of Macadamia In-shell Nuts

HUANG Kechang¹, WANG Xuemin^{2,3}, HU Mingdong^{2,3}, JIANG Jiatai^{2,3}, GUO Gangjun^{1*}

1. Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Disi Enterprise Group Nut Co., Ltd., Yingjiang 679300, China;

3. Dehong Disi Nut Development Co., Ltd., Mangshi 678400, China

Abstract: To investigate the effects of segmented heat pump variable-temperature drying processes on the drying characteristics and quality of macadamia in-shell nuts. Four variable-temperature process programs were set up (30→33→37→42→45℃, 33→37→42→45→50℃, 35→38→42→45→50℃ and 37→39→41→43→45℃). Optimal drying process parameters were screened by measuring and analyzing indicators including kernel dry-basis moisture content, drying rate, nut cracking rate, shell sticking rate, oiled nut rate, color parameters (L^* , a^* , b^*), and texture properties (hardness, breaking force, shear force, chewiness). The results showed that for the 35→38→42→45→50℃ process, the drying rate ranged from 0.44 g/(g·h) to 0.29 g/(g·h) at 35–45℃, which was significantly higher than that of other processes. Its total drying time was only 120 h, and the final dry-basis moisture content decreased to 2.91%. This process achieved the lowest nut cracking rate of 4.33% and shell sticking rate of 4.67%, with a zero oiled nut rate. The kernel exhibited the best color retention with a total color difference ΔE of 9.44, as well as the minimum hardness of 147.07 N and chewiness of 24.74 N, delivering crisp texture and favorable taste. This study concluded that the 35→38→42→45→50℃ schedule is the optimal variable-temperature drying process. It can markedly shorten drying time and improve processing efficiency and product quality while ensuring a low nut cracking rate, no oiled nuts, and desirable kernel color and texture.

Key words: macadamia; in-shell nuts; drying; variable temperature process; quality

收稿日期: 2026-06-16

基金项目: 科技人才与平台计划“云南省科技副总项目”

作者简介: 黄克昌(1970—), 男, 副研究员, 研究方向为农产品加工与品质控制。E-mail: huangkechang@sina.com

*通信作者: 郭刚军(1980—), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为食品加工和植物中天然产物提取、分离与功能。

E-mail: guogangjun2001@126.com

澳洲坚果 (*Macadamia* spp.) 是原产于澳大利亚的世界著名坚果^[1], 其果仁营养丰富, 富含不饱和脂肪酸、蛋白质及多种矿物质^[2]。截至 2023 年, 云南省澳洲坚果种植面积为 275 871 hm², 占全国总面积的 81.97%, 成为中国及世界上最大的澳洲坚果种植基地^[3]。澳洲坚果采收季节集中, 鲜果含水率高(带壳果干基含水率约 33%)^[4], 若不及时、温和地加以干燥, 极易霉变、变质^[5]。传统的澳洲坚果干燥环节普遍存在裂果率高、壳仁分离效率受含水率与干燥均匀性制约、油果及能耗大等问题^[6-8], 制约产业升级, 因此开发高效、节能、优质的干燥工艺具有重要现实意义。

澳洲坚果传统干燥流程耗时超 1 个月, 需在农场干燥 3 至 4 周, 再运到加工厂经循环料仓热风干燥 6 d^[9]; 恒温热风干燥, 温度控制不当易导致果壳开裂、果仁黏壳及出现油果。热泵干燥基于逆卡诺循环, 可实现低温、精准控温控湿, 已成功用于果蔬及坚果干燥, 能较好保留营养成分和色泽^[10]。变温干燥可动态调节干燥驱动力, 前期低温利于水分均匀迁移, 中期中温促进自由水蒸发, 后期高温脱除结合水, 同时避免热损伤。目前针对澳洲坚果带壳果的系统变温干燥研究仍少见, 尤其缺乏不同升温工艺下对裂果率、黏壳率、油果率、色泽及质构的综合评价。本研究基于德宏迪思坚果开发有限公司的热泵干燥仓, 设计了 4 种典型阶梯升温程序, 研究比较不同变温干燥工艺下澳洲坚果带壳果干燥特性、产品品质(裂果率、黏壳率、油果率、色泽、质构)的差异, 明确各温度段的调控效果, 确定最优变温干燥工艺参数, 以在最短时间内将果仁含水率降至 3% 以

下, 同时使坚果的裂果率、黏壳率、油果率达到规定标准, 果仁保持良好的色泽与酥脆口感, 为澳洲坚果加工提供理论依据和技术规范。

1 材料和方法

1.1 材料

试验所用澳洲坚果为德宏迪思坚果开发有限公司收购的经脱皮、水洗的带壳鲜果, 单个干燥仓处理量为 18 t。

1.2 设备

澳洲坚果全自动控温控湿干燥仓(佛山市云械未来食品机械有限公司), 具备温度、湿度、风速可调功能, 温度控制精度 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; ME204E 电子分析天平(梅特勒-托利多仪器有限公司); NS800 型色差仪(广东三恩时智能科技有限公司); BGZ-70 电热恒温鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司); TMS-pilot 食品质构测定仪(美国 Food Technology Corporation 公司)。

1.3 方法

1.3.1 澳洲坚果带壳果变温干燥实验

采用分段式变温干燥工艺, 每个工艺设 5 个温度阶段, 各温度点为 30、33、35、37、38、39、41、42、43、45、50 $^{\circ}\text{C}$, 每段干燥时长 12~48 h, 总干燥时长 120~156 h, 具体干燥工艺参数见表 1。干燥过程中, 每分段结束即随机选取 3 份样品, 破壳取果仁测定其含水率, 直至果仁含水率降至 3% 或达到平衡含水率为止。每种分段式变温干燥工艺结束后, 取样测定裂果率、黏壳率、油果率, 色泽参数 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 质构硬度、破裂力及剪切力等指标。

表 1 澳洲坚果带壳果不同变温干燥工艺参数

工艺号	温度程序/ $^{\circ}\text{C}$	各分段干燥时长/h	排湿时长/min	保温时长/min
1	30→33→37→42→45	30→24→24→24→48	10→10→10→10→3	0→0→2→2→7
2	33→37→42→45→50	12→36→12→12→48	10→8→6→5→3	2→4→6→7→9
3	35→38→42→45→50	12→24→12→24→48	10→8→5→10→3	2→4→5→2→7
4	37→39→41→43→45	24→36→12→24→36	10→8→5→3→2	2→4→5→6→8

1.3.2 含水率测定方法

按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法进行果仁含水率的测

定^[11]。含水率均用干基表示, 重复测定 3 次, 取平均值。使用式(1)计算澳洲坚果在干燥过程中的干基含水率。

$$M_t = \frac{X_t - X_g}{X_g} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_t 为任一干燥时刻 t 的干基含水率; X_t 为样品质量, g; X_g 为样品的绝对干物质质量, g。

1.3.3 干燥速率(R_d) 计算

干燥速率计算参考刁卓越等^[12]的方法以公式(2)计算:

$$R_d = -\frac{dM}{dt} \approx -\frac{\Delta M}{\Delta t} = -\frac{M_i - M_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

即求任意时刻干基含水率对时间的微分。

式中: R_d 为干燥速率, g/(g·h); 负号(-)表示含水率降低; M_i 为干燥过程中 i 时刻的干基含水率; M_{i-1} 为干燥过程中 $i-1$ 时刻的干基含水率; t_i 、 t_{i-1} 为时间, h。

1.3.4 裂果率测定

裂果率指在干燥过程中果壳发生破裂的坚果数占抽样总数的百分比。随机抽取 100 粒坚果, 统计裂果数, 计算公式如下:

$$\text{裂果率} = \frac{N_{\text{cracked}}}{N_{\text{total}}} \times 100\%$$

式中, N_{cracked} 为抽样中壳裂的坚果数, N_{total} 为抽样坚果总数。

1.3.5 黏壳率测定

黏壳率指干燥后果仁与果壳内壁粘连、难以完整分离的坚果数占抽样总数的百分比。随机抽取 100 粒坚果, 破壳后统计黏壳果数, 计算公式如下:

$$\text{黏壳率} = \frac{N_{\text{sticky}}}{N_{\text{total}}} \times 100\%$$

式中, N_{sticky} 为抽样中果仁黏壳的坚果数, N_{total} 为抽样坚果总数。

1.3.6 油果率测定

油果率指因干燥温度过高或速度不当导致果仁油脂析出、表面呈现油渍状变质的坚果数占抽样总数的百分比。随机抽取 100 粒坚果, 破壳后统计油果数, 计算公式如下:

$$\text{油果率} = \frac{N_{\text{oily}}}{N_{\text{total}}} \times 100\%$$

式中, N_{oily} 为抽样中油脂析出的变质坚果数, N_{total} 为抽样坚果总数。

1.3.7 色泽的测定

使用 NS800 型色差仪测定干燥的澳洲坚果果仁的色泽参数 L^* 、 a^* 、 b^* 值。每份样品随机选取 3 颗果仁进行测量, 每颗果仁沿纵轴方向分别选取上部与下部 2 个测定点, 以覆盖果仁因与果壳接触程度不同可能造成的色泽差异。每个测定点重复测量 3 次, 取仪器自动给出的该点均值。每份样品的最终色泽数据为所有测定点的算术平均值。按色差公式(3)计算干燥过程中各时刻果仁与初始样品的总色差值 ΔE , 以此评价不同干燥条件下澳洲坚果果仁色泽变化程度^[13]。

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

式中: ΔE 为总色差; L_0 、 a_0 、 b_0 为干燥前鲜果仁色值; L^* 、 a^* 、 b^* 为在干燥过程中时间 t 时测得的果仁色值。

1.3.8 质构的测定

采用 TMS-pilot 食品质构测定仪, 对每种干燥方式处理后的澳洲坚果果仁选取 6 粒进行硬度、破裂力及剪切力的测定。测试前, 用游标卡尺挑选高度为 (14 ± 1) mm 的果仁样品。硬度与破裂力测试: 选用 TMS-75 mm 圆盘探头, 测试条件参考秦力悦等^[14]的方法进行修改, 力量感应元量程为 500 N, 起始力 0.75 N, 检测速度 30 mm/min, 形变量 50%。剪切测试: 选用轻型单刀复合剪切探头, 起始力 0.75 N, 检测速度 30 mm/min, 探头回升至样品表面上方 25 mm 处。每个样品重复测定 3 次, 取平均值。

1.4 数据处理

每项指标均测定 3 组平行值, 试验结果以平均值 $\pm$ 标准差(SD)表示。采用 Origin 2021 软件绘图, SPSS 25.0 软件进行数据分析, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 变温干燥过程中澳洲坚果带壳果含水率变化特性

由图 1 可知: 在 4 种变温干燥工艺条件下, 澳洲坚果带壳果的干基含水率均随干燥变温分段时间延长而呈下降趋势。35→38→42→45→50 °C 工艺起始温度为 35 °C, 经 8 h 预干燥后含水率由

32.84%降至29.32%,随后依次经38、42、45℃阶梯升温,含水率逐步降至11.46%,最终在50℃阶段干燥60 h,总干燥时长仅120 h,干基含水率降至2.91%,低于国家标准规定的3%安全限值^[15]。相比之下,30→33→37→42→45℃因起始温度过低、后期干燥驱动力不足,总时长达156 h且终含水率仍为4.00%;33→37→42→45→50℃虽终含水率达标(2.84%),但总时长132 h,且长时间50℃处

理易增加品质劣变风险;工艺37→39→41→43→45℃因最高温度仅45℃,后期脱水缓慢,144 h后含水率仍为3.03%。综合比较,35→38→42→45→50℃,在保证产品终含水率低于3%的前提下,总干燥时长最短(120 h),干燥效率显著优于其他3种工艺,因此为4种变温工艺中的最佳工艺。

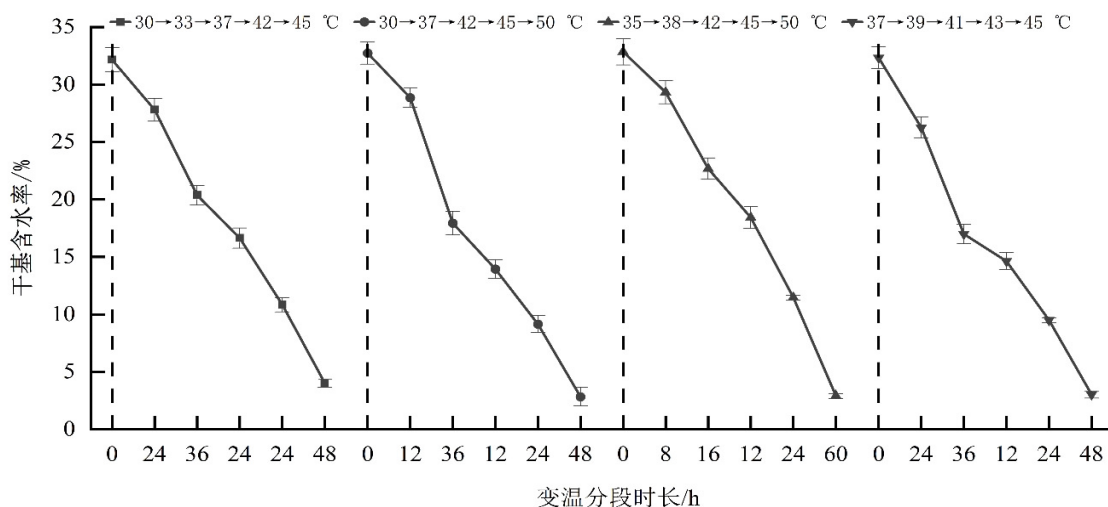


图1 澳洲坚果带壳果不同变温干燥工艺的干燥曲线

2.2 变温干燥过程中澳洲坚果带壳果干燥速率的变化特征

根据图2可知:4种工艺的干燥速率随分段温度递增而整体呈现初期速率较高、随后持续下降的趋势,部分工艺表现为先升后降的单峰特征,符合典型的以降速期为主的热风干燥动力学特征^[12]。其中,35→38→42→45→50℃在35、38、42、45℃阶段的干燥速率分别为0.44、0.42、0.35、0.29 g/(g·h),显著高于其他工艺的对应该温度段,展现出前期和中期优异的水分蒸发效率;但进入50℃后,速率骤降至0.14 g/(g·h),表明此时物料含水率已降至较低水平,水分迁移由内部扩散主导。35→38→42→45→50℃的总干燥时长仅120 h,为4种工艺中最短。30→33→37→42→45℃各阶段速率分别为0.18、0.21、0.16、0.24、0.14 g/(g·h),整体速率偏低,总时长达156 h;33→37→42→45→50℃初期速率较高[0.32、0.30、0.33 g/(g·h)],但45℃和50℃阶段分别降至

0.20和0.13 g/(g·h),后期驱动力衰减明显,总时长132 h;37→39→41→43→45℃各阶段速率依次为0.25、0.26、0.20、0.21、0.13 g/(g·h),因最高温度仅45℃且后期速率不足,总时长为144 h。综合分析,35→38→42→45→50℃在保证最终含水率达标的前提下实现了最短干燥时长,为4种工艺中的最优变温干燥方案。

2.3 不同变温干燥工艺对澳洲坚果带壳果品质指标的影响

由表2可知:不同变温干燥工艺对澳洲坚果带壳果的裂果率和黏壳率均有明显影响,而油果率在各工艺中均为0%。

33→37→42→45→50℃的裂果率最高,达9.67%;30→33→37→42→45℃次之,为7.33%,两者存在显著差异。35→38→42→45→50℃与37→39→41→43→45℃的裂果率分别为4.33%和5.33%,两者无显著差异,但均显著低于30→33→37→42→45℃和33→37→42→45→50℃。这表明

起始温度过低或升温梯度过陡均会加剧裂果发生;而适当提高起始温度至35~37℃并优化升温梯度,可将裂果率控制在5.5%以下,其中35→

38→42→45→50℃在最短干燥时长(120 h)内实现了最低裂果率(4.33%),表现出最优的防裂效果。

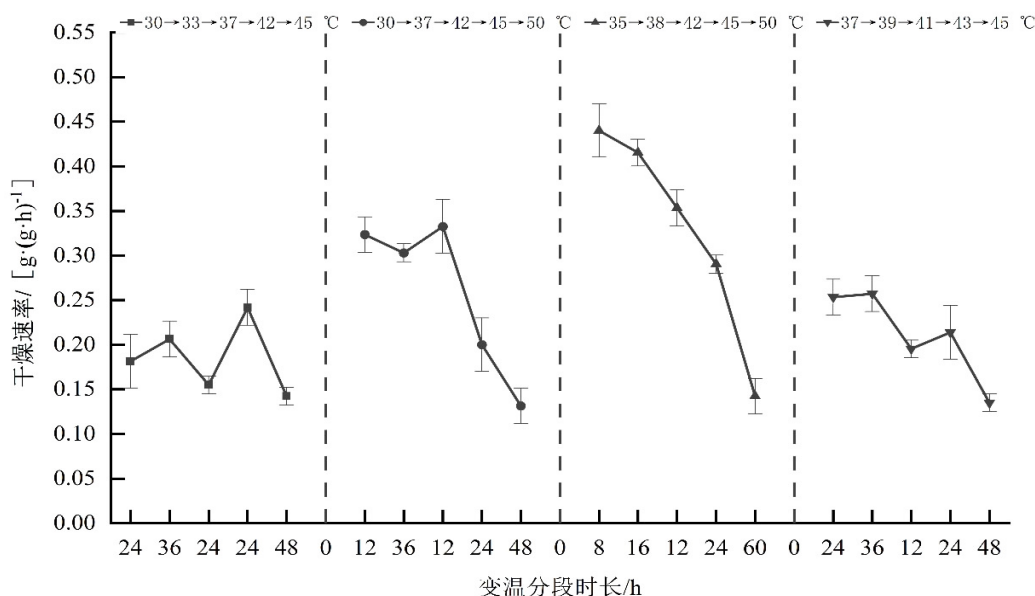


图2 澳洲坚果带壳果不同变温干燥工艺的干燥速率曲线

表2 不同变温干燥工艺下澳洲坚果带壳果品质指标

工艺号	温度程序/℃	干燥时长/h	裂果率/%	黏壳率/%	油果率/%
1	30→33→37→42→45	156	7.33±1.15 ^b	8.33±0.58 ^a	0
2	33→37→42→45→50	132	9.67±1.15 ^a	6.00±1.00 ^b	0
3	35→38→42→45→50	120	4.33±1.15 ^c	4.67±1.15 ^b	0
4	37→39→41→43→45	144	5.33±0.58 ^c	5.67±1.15 ^b	0

30→33→37→42→45℃的黏壳率最高(8.33%),显著高于其他3组。其他3组的黏壳率分别为6.00%、4.67%和5.67%,三者之间无显著差异。35→38→42→45→50℃的黏壳率最低(4.67%),说明其干燥工艺最有利于果仁与果壳的完整分离。

所有4种变温干燥工艺的油果率均为0%。这表明在本实验条件下,热泵变温干燥能够有效保护澳洲坚果果仁的油脂稳定性,未导致因温度过高或时间过长出现油脂析出或氧化变质现象。

35→38→42→45→50℃工艺在裂果率和黏壳率上均处于最低水平,油果率为0,同时干燥时间最短,是4种工艺中最优的变温干燥方案。

2.4 不同变温干燥工艺对澳洲坚果带壳果果仁色泽的影响

由表3可知:干燥后各工艺的 L^* 值较新鲜果

仁均显著下降,表明干燥导致果仁色泽变暗。其中工艺33→37→42→45→50℃的 L^* 值最低(79.62),显著低于其他工艺,而30→33→37→42→45℃、35→38→42→45→50℃和37→39→41→43→45℃之间无显著差异。这说明工艺33→37→42→45→50℃,因50℃高温持续时间较长,褐变最为明显;35→38→42→45→50℃虽同样达到50℃,但通过优化升温梯度,亮度保持较好。

干燥后各工艺的 a^* 值较新鲜果仁均显著升高,呈现偏红色调,这与非酶褐变中的美拉德反应有关。30→33→37→42→45℃的 a^* 值最高,37→39→41→43→45℃次之,两者无显著差异;33→37→42→45→50℃为1.47,与前述两组差异不显著;35→38→42→45→50℃的 a^* 值最低(1.28),显著低于30→33→37→42→45℃和37→39→41→43→45℃,表

明其在抑制红褐色素生成方面效果最优。

干燥后各工艺的 b^* 值较新鲜果仁均显著升高,果仁向黄色转变。37→39→41→43→45 °C 的 b^* 值最高,显著高于其他工艺;30→33→37→42→45 °C、33→37→42→45→50 °C、35→38→42→45→50 °C 的 b^* 值分别为 20.16、20.29、19.78,三者间无显著差异,其中 35→38→42→45→50 °C 的 b^* 值最低,黄变程度相对最小。

表 3 不同变温干燥工艺下澳洲坚果带壳果果仁的色泽参数值

工艺号	温度程序/°C	L^* 值	a^* 值	b^* 值	ΔE 值
	室温	84.91±0.52 ^a	0.12±0.18 ^a	10.57±0.67 ^a	
1	30→33→37→42→45	81.51±0.47 ^b	1.66±0.01 ^c	20.16±0.51 ^b	10.61±1.28 ^{ab}
2	33→37→42→45→50	79.62±0.39 ^c	1.47±0.04 ^{bc}	20.29±0.57 ^b	10.24±0.51 ^{ab}
3	35→38→42→45→50	81.76±0.27 ^b	1.28±0.13 ^b	19.78±0.41 ^b	9.44±0.46 ^a
4	37→39→41→43→45	81.19±0.21 ^b	1.58±0.12 ^c	21.45±0.58 ^c	11.27±0.65 ^b

ΔE 值反映整体色差,数值越小颜色保持越好。35→38→42→45→50 °C 的 ΔE 值最小,显著低于 37→39→41→43→45 °C,与 30→33→37→42→45 °C (10.61) 和 33→37→42→45→50 °C (10.24) 无显著差异,表明其总体色泽保持最佳。尽管工艺 33→37→42→45→50 °C 的 ΔE 值也较低,但其 L^* 值显著偏低(最暗),视觉品质较差。

综上,工艺 35→38→42→45→50 °C 的 L^* (81.76)、 a^* (1.28)、 b^* (19.78) 及 ΔE (9.44) 均处于最优或次优水平,其红绿值最低、总色差最小,说明该工艺能有效抑制非酶褐变,可较好保持果仁天然色泽,是 4 种工艺中的最优方案。

2.5 不同变温干燥工艺对澳洲坚果带壳果果仁质构的影响

根据表 4 可知:不同变温干燥工艺对澳洲坚果果仁的硬度、破裂力、剪切力及咀嚼性等指标影响明显。

表 4 不同变温干燥工艺的澳洲坚果带壳果果仁质构仪器测量结果

工艺号	温度程序/°C	硬度/N	破裂力/N	剪切力/N	咀嚼性/N
1	30→33→37→42→45	162.44±5.82 ^{ab}	213.20±4.81 ^b	63.11±4.80 ^a	60.57±5.88 ^a
2	33→37→42→45→50	164.51±9.71 ^{ab}	252.44±11.37 ^a	93.28±2.06 ^c	36.70±4.96 ^b
3	35→38→42→45→50	147.07±10.00 ^a	229.55±11.45 ^b	78.81±4.68 ^b	24.74±5.96 ^c
4	37→39→41→43→45	170.68±10.91 ^b	174.62±5.35 ^c	63.81±5.48 ^a	46.66±6.72 ^b

35→38→42→45→50 °C 的硬度最低,显著低于 37→39→41→43→45 °C,与 33→37→42→45→50 °C、30→33→37→42→45 °C 相比亦呈降低趋势,表明该工艺下其果仁质地最为柔软,适口性更佳。破裂力以 37→39→41→43→45 °C 最低,30→33→37→42→45 °C 次之,35→38→42→45→50 °C 居中,33→37→42→45→50 °C 最高。30→33→37→42→45 °C 与 37→39→41→43→45 °C 剪切力相近,显著低于 35→38→42→45→50 °C 和 33→37→42→45→50 °C,33→37→42→45→50 °C 剪切力最高,质地最紧实。35→38→42→45→50 °C 的咀嚼性最低,显著低于工艺 30→33→37→42→45 °C、37→39→41→43→45 °C 及 33→37→42→45→50 °C,低咀嚼性赋予果仁更易咀嚼、酥脆的口感。

综合比较,工艺 35→38→42→45→50 °C 在硬度、咀嚼性上均表现最优,质地酥脆,尽管其破裂力和剪切力略高于工艺 37→39→41→43→45 °C,但结合干燥时间(120 h 最短)及裂果率、黏壳率、色泽等品质指标,综合性能最佳。从质构特性角度:工艺 30→33→37→42→45 °C 与 37→39→41→43→45 °C 虽在某些质构参数上占优,但干燥时间过长(156 h、144 h)且裂果率、黏壳率较高;工艺 33→37→42→45→50 °C 果仁最为坚硬(破裂力、剪切力均最高),口感较差。因此,工艺 35→38→42→45→50 °C 制备的澳洲坚果果仁具有最佳食用品质。

3 结论

本研究对比了4种热泵变温干燥工艺对澳洲坚果带壳果干燥特性及品质的影响,结果表明:最优工艺为35→38→42→45→50℃,总干燥时长120 h,可将果仁干基含水率从32.84%降至2.91%,干燥速率在35~45℃阶段保持0.44~0.29 g/(g·h),显著高于其他工艺;该工艺的品质指标综合表现最佳,裂果率(4.33%)、黏壳率(4.67%)均为最低,油果率为0,色泽保持最优(ΔE 为9.44),质构最优,硬度147.07 N,咀嚼性24.74 N。本研究结果确定的工艺参数在保证产品高品质的同时显著提升干燥效率,可为澳洲坚果带壳果的工业化热泵干燥提供直接技术参考。

试验发现,干燥仓内下层坚果果仁的含水率下降速度显著快于上层,其原因在于热空气自底部进入并在上升过程中不断携带水蒸气,导致上层相对湿度升高、干燥驱动力降低。为改善干燥均匀性,建议:优化风道设计,增设导流板或采用循环风道,减小上下层温差;定期翻动物料,或增加翻仓装置。此外,针对不同初始含水率的批次,可适当调整各阶段干燥时长:高含水率时,适当延长35~38℃阶段的时长,以充分预热并促进水分均匀迁移;低含水率时,可适度缩短后期高温阶段的时长,以降低能耗并避免过度干燥。

参考文献:

- [1] MANATUNGA SL, FURTADO A, TOPP B, et al. Analysis of phylogenetic relationships in macadamia shows evidence of extensive reticulate evolution[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1394244.
- [2] KANG Z, GUO G, HE F, et al. An analysis of the main nutrient components of the fruits of different macadamia (*Macadamia integrifolia*) cultivars in rocky desertification areas and a comprehensive evaluation of the mineral element contents[J]. *Horticulturae*, 2024, 10(5): 468.
- [3] 杨艳芬, 段敏仙, 张碧蓉, 等. 澳洲坚果加工与产业副产物综合利用研究进展[J]. *中国油脂*, 2024, 49(12): 100-104.
- [4] BOROMPICHAICHARTKUL C, LUENG SODE K, CHIN-PRAHAST N, et al. Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(3): 348-353.
- [5] BUTHELEZI NMD, TESFAY SZ, MAGWAZA LS. Influence of roasting on antioxidants, fatty acids, sensory properties and oxidative stability of macadamia nuts[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 278: 109850.
- [6] WANG Y, ZHANG L, JOHNSON J, et al. Developing hot air-assisted radio frequency drying for in-shell macadamia nuts[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(1): 278-288.
- [7] RANTUNG R, TOOY D, AMELIA P, et al. Design and technical evaluation of the PTR-TETA20 macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) sheller[J]. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 2025, 11: 478-485.
- [8] WEI Y, XU W, FU J, et al. Quality damage and control measures of macadamia nuts during primary processing[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2025(1): 1205390.
- [9] SILVA FA, MARSAIOLI A, MAXIMO GJ, et al. Microwave assisted drying of macadamia nuts[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3): 550-558.
- [10] 杨德军. 空气源热泵干燥技术在农产品干燥领域的应用研究[J]. *南方农机*, 2026, 57(4): 67-69.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S].
- [12] 刁卓超, 杨薇, 李建欢, 等. 澳洲坚果热风干燥特性研究[J]. *食品与机械*, 2010, 26(6): 44-46, 78.
- [13] 陆敬伊, 李娅, 帅希祥, 等. 不同贮藏温度对澳洲坚果鲜果品质及代谢变化的影响[J]. *果树学报*, 2026, 43(3): 635-648.
- [14] 秦力悦, 石萍萍, 李荣辉, 等. 基于主成分分析和聚类分析的烘烤类澳洲坚果果仁综合品质评价[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(18): 331-341.
- [15] 云南省林业和草原科学院, 云南省林业和草原技术推广总站, 云南省热带作物科学研究所, 等. 澳洲坚果: GB/T 43643—2024[S].