猕猴桃切片中短波红外干燥特性及动力学模型

曾目成,毕金峰,陈芹芹,刘璇,吴昕烨,焦艺

(中国农业科学院农产品加工研究所,农业部农产品加工综合性重点实验室,北京 100193)

摘要:本试验研究了猕猴桃切片在不同的干燥温度(50、60、70、80℃)、干燥功率(675、1350、2025 W)条件下的中短波红 外干燥特性试验,结果表明:干燥温度对猕猴桃切片干燥速率的影响较大,干燥温度越高,干燥用时越短;干燥功率对猕猴桃切片干 燥时间影响较小;降速阶段为猕猴桃中短波红外干燥的主要阶段。通过对猕猴桃干燥动力学数学模型拟合发现:Page 模型对猕猴桃 切片干燥过程的拟合性较好,模型的预测值与实验值吻合性好,可以用来描述和预测猕猴桃的中短波红外的干燥过程。通过费克第二 定律求出干燥过程中的水分有效扩散系数(D_{eff}),发现其值在 3.3970×10⁹~1.2960×10⁸ m²% 范围内,且随着温度和功率的升高而增大; 通过阿伦尼乌斯方程计算出猕猴桃切片中短波红外干燥活化能在 30.237~40.551 kJ/mol 范围内。该研究为中短波红外干燥技术应用于 猕猴桃的干燥提供了技术依据。

关键词: 猕猴桃切片; 中短波红外干燥; 干燥动力学; 水分有效扩散系数; 活化能 文章篇号: 1673-9078(2014)1-153-159

Drying Characteristics and Kinetics of Kiwifruit Slice under Mediumand

Shortwave Infrared Radiation

ZENG Mu-cheng, BI jin-feng, CHEN Qin-qin, LIU Xuan, WU Xin-ye, JIAO Yi

(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, CAAS, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: The experiment was carried out at different drying temperatures (50, 60, 70, 80 °C) and infrared powers (675, 1350, 2025 W). The results showed that drying temperature had a significant influence on the drying rate of kiwifruit. The drying time decreased with the increase of the drying temperature and infrared power. The processing time of kiwifruit was less affected by the power. According to statistical parameters. The Page model was found to be the best to simulate medium and shortwave infrared radiation drying of kiwifruit slices among the six mathematical models. There was a good agreement between the experimental and predicted values. Since the medium and shortwave infrared radiation drying of kiwifruit slices was mainly dominated by falling period, the Fick's second law of diffusion was employed to calculate the value of moisture effective diffusivity (D_{eff}), which ranged from 3.3970×10^{-9} to 1.2960×10^{-8} m²/s, and increased with increasing the drying temperature and infrared power. The activation energy determined from Arrhenius equation drying technology in drying kiwifruit.

Key words: kiwifruit; medium and short wave infrared radiation drying; drying kinetics; moisture effective diffusivity; activation energy

猕猴桃又名羊桃、藤梨、基维果(kiwifruit),属 于落叶木质藤本植物果实。在我国种植十分广泛,其 中以陕西的秦岭、巴山山区、湖南的西部山区、河南 的伏牛山区分布最多。猕猴桃果实中含有大量的糖、 蛋白质、氨基酸等多种有机物和人体必需的多种矿物 质及维生素,具有很高的营养、保健功能,尤以维生 收稿日期: 2013-09-24

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费资助(201303073);国家"十 二五"科技支撑计划项目(2012BAD31B06)

作者简介:曾目成(1989-),男,在读硕士研究生

通讯作者:毕金峰(1970-),男,博士,研究员,研究方向:果蔬精深加 工与副产物综合利用技术 素 C 的含量高,远远超过其他水果,故有"Vc 之王" 之称^[1]。但在常温条件下,猕猴桃极易因微生物和酶 的作用而发生各种变化,从而导致腐烂变质,难以久 藏,使其货架期大大缩短^[2]。如能将新鲜猕猴桃加工 成干制品,则可以很好地延长其保存期。目前对猕猴 桃的干燥方式研究有:真空冷冻干燥、冷冻干燥、热 风干燥等^[3~4],研究多集中在对猕猴桃切片干燥工艺的 探讨,而对干燥过程中特性研究较少。对干燥过程中 的动力学研究可以很好地促进设备及生产工艺的改 进。国内外对果蔬原料干燥特性进行了广泛深入的研 究,如李汴生等^[5]在对糖渍加应子样品在不同温度下 热风干燥特性及模型研究,发现加应子热风干燥是内 部水分扩散控制的降速干燥过程;温度越高,干燥速 率越快;Page模型适合对加应子干燥过程进行描述和 预测。Sharma等⁶⁰在对洋葱的红外干燥特性研究时, 发现:干燥温度越高,干燥速率越快;Page模型对其 干燥动力学数学模型拟合效果最好。与传统的干燥方 式如热风干燥相比,中短波红外干燥技术具有加热效 率高、干燥产品品质好等特点,其原理是在中短波红 外辐射加热过程中,当红外的发射波长与水分的吸收 波长(水通常吸收波长 2.7~3 μm 的红外线)相一致时 红外辐射会很快被水分子吸收而转化为水分子的热运 动,同时水分子运动加速,导致其失水^[7]。本研究采 用中短波红外技术对猕猴桃切片进行干燥,研究不同 干燥温度和功率下猕猴桃切片的干燥特性,建立猕猴 桃中短波红外干燥数学模型,以期为其工业化运用提 供技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜猕猴桃买自北京海淀区清河小营市场。剔除 烂果,挑选大小一致的猕猴桃作为试验材料,试验前 将物料贮放于 4±0.5℃的冷库。

1.2 仪器

德丰牌切片机: FA-200, 广东省南海市德丰电热 设备厂; 中短波红外干燥箱: 圣泰科红外科技有限公 司; 电子天平: AUW220型, 日本岛津公司。

1.3 方法

人工去除猕猴桃表皮,按要求进行切成 8 mm 的 薄片待用,去皮后鲜样采用 105 ℃恒温干燥法得到其 初始干基水分含量为 7.926 (d.b)。用电子天平称取质 量为 100 g左右的猕猴桃切片,单层平铺放入己工作 稳定的中短波红外箱的托盘。按不同的干燥温度(50、 60、70、80 ℃)、干燥功率(675、1350、2025 W)条 件下对猕猴桃进行干燥试验,每隔一定时间测定样品 质量变化直至干基水分含量降到 0.1 (d.b)时停止试 验,每组试验重复三次,取均值。

1.4 干燥模型及评价标准

试验中选用的 5 个干燥动力学数学模型, 见表 1。 其中水分比 (MR)用于表示一定干燥条件下物料 的剩余水分率, 计算公式如下:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \tag{1}$$

注:MR-水分比;M-样品任意时刻的干基含水率;Me-样

品的平衡干基含水率; Mo-样品的初始干基含水率。

表 1 用于干燥曲线分析的数学模型

Table 1 Mathematical models for drying kinetics

编号	模型名称	模型
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pebis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two-term model	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$

注:此表格数据引自参考文献^[8]。

将试验得到的数据进行拟合回归分析,并用决定 系数 R²、卡方检验值 χ² 和均方根误差 RMSE 来评价 模型拟合的好坏,其表达式如下:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^{2}}{N}}$$
(3)

注: R^2 值越大、 χ^2 和 RMSE 越小,说明模型的拟合性越好。

于燥速率可用公式(4)表示:

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

注: DR-干燥速率; M_{t+dt}-样品时刻的 t+dt 干基含水率; M_t-t 时刻的干基含水率; dt-相邻 2 次测量的时间间隔。

1.5 水分有效扩散系数的计算

当长方形、圆柱形和球形等形状的物料的干燥主要由降速阶段控制时,可以用菲克扩散方程来描述其 干燥特性,方程的具体解法由 Crank¹⁹¹在 1975 年提出。 假设所有的样品都有相同的初始水分分布,那么样品 的有效扩散系数满足如下方程:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}]$$
(5)

注: D_{eff}-有效水分扩散系数/ (m2/s); L-样品厚度的一半

/m。

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

两边取对数便可化为如下等式:

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

(6)

通过等式(7)便可计算出 Defo

采用 Origin 8.0 数据分析以及绘图。

2.1 结果与分析



外干燥特性的影响



图 1 不同干燥温度对水分含量和干燥速率的影响 Fig.1 Influence of drying temperatures on the moisture content

and drying rate

注:干燥功率为1350W。

在干燥功率为1350 W,不同干燥温度对猕猴桃切 片中短波红外干燥过程的水分含量和干燥速率的影响 如图1所示。随着干燥的进行,猕猴桃水分含量逐渐 下降;干燥温度对猕猴桃的干燥速率影响较大,温度 越高,干燥速率越快。干燥温度分别为50、60、70 和80℃条件下,猕猴桃的干燥时间分别为450、390、 240和140min。类似的结果发生在对葡萄副产物的红 外干燥过程^[10]。由干燥速率随水分含量的变化可知, 整个干燥除了开始的短暂升速,降速阶段为主要的控 制过程,说明在猕猴桃的中短波红外干燥过程中,内 部水分扩散是主导因素,直接控制了猕猴桃切片的干 燥速率。试验过程中发现,当干燥温度高于70℃时, 猕猴桃产品色泽变暗,品质不佳,试验获得的最佳干 燥温度为60~70℃。



图 2 不同干燥功率对水分含量和干燥速率的影响 Fig.2 Influence of power levels on the moisture content and

drying rate

注:干燥温度为60℃。

图 2 为干燥温度 60 ℃下,干燥功率对猕猴桃切 片中短波红外干燥过程的水分含量和干燥速率的影响 图。干燥功率分别为 675,1350 和 2025 W 条件下, 猕猴桃的干燥时间分别为 420、390 和 330 min。干燥 功率对干燥速率有影响,随着干燥功率的加大,干燥 时间缩短。这与甘薯和胡萝卜红外干燥特性结果相似 ^[11~12]。从图 2 干燥速率曲线不难看出,干燥主要由降 速阶段控制。由图 1 和图 2 可知,干燥温度和干燥功 率均对干燥时间有影响,但在试验范围内干燥温度对 干燥时间的影响(p<0.05)比干燥功率对其影响更为 突出。

2.2 干燥模型的确定

对不同干燥温度下猕猴桃切片中短波红外干燥的 *MR*数据进行分析,选取了 5 个数学模型(表 1)进行拟 合,其结果见表 2。由表 2 可知:所用 5 个数学模型 均能很好地模拟猕猴桃切片的中短波红外干燥过程中 的水分变化,其中 Page 模型拟合程度最好,其 R^2 均 值高达 0.99841, χ^2 和 *RMSE* 的均值分别为 1.72×10⁴、 0.003267。模型的拟合值与试验值的对比如图 3 所示。 在对胡萝卜的热泵真空干燥和辣椒的太阳能干燥也发 现代食品科技

现 Page 模型拟合效果最好^[13~14]。

表 2 不同中短波红外干燥条件下猕猴桃切片的干燥模型数据拟合结果

$Table\ 2\ Statistical\ results\ of\ drying\ models\ for\ kiw if ruit\ slices\ under\ the\ different\ medium\ and\ shortwave\ infrared\ radiation\ conditions$

模型	温度/℃	功率/W		模型参数	t i	χ^2	RMSE	R^2
				k				
	50	675		0.00837		0.00209	0.05656	0.98180
	60	675		0.01413		0.00201	0.04830	0.98083
	70	675		0.02060		0.00253	0.04555	0.97647
	80	675		0.02461		0.00341	0.04427	0.97099
	50	1350		0.01144		0.00179	0.04478	0.98342
Newton	60	1350		0.01906		0.00128	0.03068	0.98604
	70	1350		0.02475		0.00177	0.03005	0.98259
	80	1350		0.02937		0.00228	0.02962	0.979 <mark>6</mark> 1
	50	2025		0.01008		0.00239	0.05963	0.97914
	60	2025		0.01486		0.00230	0.04835	0.97876
	70	2025		0.02112		0.00229	0.04121	0.97839
	80	2025		0.02445		0.00299	0.03886	0.97402
			k	п				
	50	675	0.00182	1.3208		1.99×10 ⁻⁴	0.00518	0.99827
	60	675	0.00292	1.36373		1.96×10 ⁻⁴	0.00450	0.99814
	70	675	0.00390	1.41361		9.72×10 ⁻⁴	0.00165	0.99910
	80	675	0.00457	1.43398		1.56×10 ⁻⁴	0.00187	0.99867
	50	1350	0.00277	1.31473	\mathbf{X}	2.05×10 ⁻⁴	0.00492	0.99810
Page	60	1350	0.00563	1.29752		1.91×10 ⁻⁴	0.00439	0.99792
U	70	1350	0.00673	1.33563		1.71×10 ⁻⁴	0.00274	0.99831
	80	1350	0.00740	1.37030		1.36×10 ⁻⁴	0.00163	0.99878
	50	2025	0.00187	1.36650		1.46×10 ⁻⁴	0.00350	0.99873
	60	2025	0.00301	1.37148		1.78×10^{-4}	0.00357	0.99836
	70	2025	0.00449	1.38594		1.24×10 ⁻⁴	0.00211	0.99883
	80	2025	0.00539	1.38833		2.62×10 ⁻⁴	0.00314	0.99773
			а	k				
	50	675	1.07382	0.00908		0.00150	0.03889	0.98701
	60	675	1.07868	0.01526		0.00149	0.03433	0.98578
	70	675	1.08494	0.02221		0.00191	0.03255	0.98219
\mathbf{V}	80	675	1.07961	0.02636		0.00282	0.03386	0.97596
Henderson	50	1350	1.07135	0.01232		0.00132	0.03157	0.98783
and Pabis	60	1350	1.06296	0.02022		0.00101	0.02323	0.98897
	70	1350	1.06328	0.02617		0.00147	0.02351	0.98553
	80	1350	1.06378	0.03101		0.00196	0.02353	0.98245
	50	2025	1.08451	0.01102		0.00164	0.03942	0.98563
	60	2025	1.07945	0.01604		0.00173	0.03450	0.98409
	70	2025	1.07875	0.02265		0.00178	0.03018	0.98324
	80	2025	1.07063	0.02600		0.00255	0.03063	0.97782

$Two term \begin{cases} a & k & c \\ 50 & 675 & 1.1024 & 0.00822 & 0.0019 & 0.02968 & 0.98969 \\ 60 & 675 & 1.0751 & 0.02047 & 0.03320 & 0.00171 & 0.02734 & 0.98411 \\ 80 & 675 & 1.1582 & 0.02047 & 0.03320 & 0.00171 & 0.02734 & 0.98687 \\ 50 & 1350 & 1.06729 & 0.0199 & 0.00645 & 0.00104 & 0.02822 & 0.98868 \\ 80 & 1350 & 1.06729 & 0.0199 & 0.00645 & 0.00104 & 0.01542 & 0.98868 \\ 80 & 1350 & 1.01113 & 0.01065 & 0.03695 & 0.0014 & 0.01342 & 0.98745 \\ 60 & 2025 & 1.10143 & 0.01669 & 0.03695 & 0.0014 & 0.02764 & 0.98669 \\ 70 & 2025 & 1.10130 & 0.01225 & 0.03695 & 0.00147 & 0.02784 & 0.9869 \\ 80 & 2025 & 1.10130 & 0.01225 & 0.03695 & 0.00147 & 0.02784 & 0.9869 \\ 70 & 2025 & 1.10085 & 0.02088 & 0.03262 & 0.00150 & 0.02500 & 0.98745 \\ 80 & 2025 & 1.10085 & 0.02088 & 0.03262 & 0.00150 & 0.02500 & 0.98745 \\ 80 & 2025 & 1.10085 & 0.02088 & 0.03262 & 0.00150 & 0.02500 & 0.98745 \\ 80 & 2025 & 1.10023 & 67028.914 & 1.10923 & 0.00128 & 0.00128 & 0.99966 \\ 70 & 675 & 0.10223 & 67028.914 & 1.10273 & 0.00128 & 0.00120 & 0.98844 \\ 60 & 675 & 0.02773 & 1.98×10^3 & 1.20778 & 0.02459 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 70 & 675 & 0.10223 & 67028.914 & 1.10273 & 0.00128 & 0.02303 & 0.99051 \\ 80 & 675 & 0.02773 & 1.98×10^3 & 1.20778 & 0.02162 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 70 & 675 & 0.10223 & 6128961 & 1.13293 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 70 & 675 & 0.1023 & 67028.914 & 1.10273 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 70 & 675 & 0.1023 & 67028.914 & 1.102778 & 0.02459 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 70 & 675 & 0.10249 & 1.20760 & 0.0259 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 70 & 675 & 0.1029 & 1.13206 & 1.13296 & 0.0239 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 70 & 205 & 0.1329 & 1.00850 & 1.13293 & 0.02149 & 0.00162 & 0.01628 & 0.99051 \\ 80 & 2025 & 0.1339 & 2006 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 2006 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 2000 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 2000 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 2000 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 2000 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 2000 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 2000 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1339 & 0.00 & 450 & 500 \\ 70 & 205 & 0.1390 & 0.0059 & 0.0059$	接上页									
				а	k	с				
$ Two-term \begin{cases} 60 & 675 & 1.09185 & 0.01454 & -0.01988 & 0.00143 & 0.03140 & 0.9864 \\ 70 & 675 & 1.15821 & 0.02047 & -0.03320 & 0.00171 & 0.02734 & 0.98671 \\ 80 & 675 & 1.15821 & 0.02073 & -0.10599 & 0.00154 & 0.01696 & 0.98671 \\ 70 & 1350 & 1.08919 & 0.0115 & -0.02560 & 0.00119 & 0.02744 & 0.98686 \\ 80 & 1350 & 1.06729 & 0.01989 & -0.00645 & 0.00104 & 0.02282 & 0.98686 \\ 80 & 1350 & 1.0341 & 0.02687 & -0.05637 & 0.00140 & 0.01542 & 0.98666 \\ 70 & 2025 & 1.11113 & 0.01005 & -0.03974 & 0.00136 & 0.03125 & 0.98686 \\ 70 & 2025 & 1.10085 & 0.02088 & -0.03262 & 0.00147 & 0.02784 & 0.98686 \\ 80 & 2025 & 1.1500 & 0.02088 & -0.03262 & 0.00147 & 0.02784 & 0.98669 \\ 70 & 2025 & 1.1500 & 0.02084 & -0.03695 & 0.00147 & 0.02784 & 0.98686 \\ 80 & 675 & -0.10923 & 6708.914 & 1.10923 & 0.00943 & 0.00128 & 0.03064 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.10923 & 6708.914 & 1.10923 & 0.00943 & 0.00128 & 0.03084 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.12073 & 1.98.10^6 & 1.20733 & 0.00149 & 0.00124 & 0.99055 \\ 50 & 1350 & -0.1206 & 168262 8 & 1.12066 & 0.0259 & 0.00162 & 0.03864 & 0.98862 \\ 50 & 1350 & -0.1206 & 1.68262 8 & 1.12066 & 0.0259 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 50 & 1350 & -0.1206 & 1.68262 8 & 1.12066 & 0.0259 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 50 & 1350 & -0.1206 & 1.68262 8 & 1.12066 & 0.0259 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 50 & 1350 & -0.1206 & 1.68262 8 & 1.12066 & 0.0259 & 0.00162 & 0.0230 & 0.99013 \\ 80 & 2025 & -0.13496 & 2503675 & 1.13496 & 0.01128 & 0.00128 & 0.0230 & 0.99013 \\ 80 & 2025 & -0.13496 & 2503675 & 1.13496 & 0.0128 & 0.00128 & 0.0230 & 0.99013 \\ 80 & 2025 & -0.13496 & 2503675 & 1.13496 & 0.0128 & 0.00128 & 0.0230 & 0.99051 \\ 80 & 2025 & -0.13496 & 2503675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00169 & 0.01694 & 0.98538 \\ \hline & & & & & & & & & & & & & & & & & &$		50	675	1.10241	0.00822	-0.04302		0.00119	0.02968	0.98969
$ Two-term \begin{cases} 70 & 675 & 1.10751 & 0.02047 & -0.03320 & 0.00171 & 0.02734 & 0.98411 \\ 80 & 675 & 1.15821 & 0.02073 & -0.1059 & 0.00154 & 0.01696 & 0.098687 \\ 60 & 1350 & 1.06799 & 0.0159 & -0.02560 & 0.00119 & 0.02744 & 0.98866 \\ 80 & 1350 & 1.06799 & 0.0189 & -0.00645 & 0.00140 & 0.01542 & 0.98745 \\ 50 & 2025 & 1.10413 & 0.02687 & -0.05637 & 0.00140 & 0.01542 & 0.98745 \\ 60 & 2025 & 1.10447 & 0.0169 & -0.03695 & 0.00147 & 0.02124 & 0.98745 \\ 60 & 2025 & 1.1043 & 0.02088 & -0.03262 & 0.00156 & 0.02500 & 0.98745 \\ 60 & 2025 & 1.1047 & 0.0169 & -0.03695 & 0.00147 & 0.02124 & 0.98849 \\ 60 & 675 & -0.10923 & 67028 914 & 1.10923 & 0.009124 & 0.01560 & 0.98848 \\ 60 & 675 & -0.10723 & 60248 914 & 1.1073 & 0.00459 & 0.00128 & 0.03084 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.10723 & 60248 914 & 1.1073 & 0.00126 & 0.00109 & 0.02280 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.10723 & 60248 914 & 1.1073 & 0.00126 & 0.00128 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.10723 & 60248 914 & 1.1073 & 0.00126 & 0.00120 & 0.01580 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.10723 & 60248 914 & 1.1073 & 0.00120 & 0.01520 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.20773 & 1.988.10^{6} & 1.2073 & 0.02459 & 0.00102 & 0.01520 & 0.988620 \\ 50 & 1350 & -0.12066 & 165262.8 & 1.12040 & 0.01230 & 0.99051 \\ 80 & 1350 & -0.12960 & 1.608.10^{7} & 1.13920 & 0.00150 & 0.02203 & 0.99031 \\ 70 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00280 & 0.02885 & 0.98851 \\ 60 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00280 & 0.02885 & 0.98851 \\ 70 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00280 & 0.02885 & 0.99107 \\ 50 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00280 & 0.02885 & 0.99107 \\ 50 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00128 & 0.00280 & 0.98851 \\ 60 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00280 & 0.02885 & 0.998851 \\ 70 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00128 & 0.02805 & 0.98851 \\ 70 & 2025 & -0.13496 & 2508.675 & 1.13496 & 0.00128 & 0.00280 & 0.02885 & 0.998851 \\ 70 & 2025 & -0.19800 & 3.04640 & 500 & 500 \\ 70 & 700 & 1.900 & 1.900 & 200 & 200 &$		60	675	1.09185	0.01454	-0.01988		0.00143	0.03140	0.9864
		70	675	1.10751	0.02047	-0.03320		0.00171	0.02734	0.98411
		80	675	1.15821	0.02073	-0.10599		0.00154	0.01696	0.98687
Logarithmic $\begin{bmatrix} 60 & 1350 & 1.06729 & 0.01989 & -0.00645 & 0.00104 & 0.02282 & 0.98868 \\ 80 & 1350 & 1.10341 & 0.02607 & -0.05637 & 0.00140 & 0.01542 & 0.98868 \\ 80 & 1350 & 1.10341 & 0.02687 & -0.05637 & 0.00140 & 0.01254 & 0.98812 \\ 60 & 2025 & 1.11047 & 0.01469 & -0.03695 & 0.00147 & 0.02784 & 0.98649 \\ 70 & 2025 & 1.10085 & 0.02088 & -0.03262 & 0.00156 & 0.02500 & 0.98825 \\ 80 & 2025 & 1.15200 & 0.02225 & -0.10979 & -0.00124 & 0.01360 & 0.98926 \\ \hline & a & b & b & k/ & & & \\ 50 & 675 & -0.10923 & 67028.914 & 1.10923 & 0.00043 & 0.00124 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.10923 & 67028.914 & 1.10923 & 0.00043 & 0.00124 & 0.98864 \\ 60 & 675 & -0.10923 & 67028.914 & 1.10923 & 0.00124 & 0.01260 & 0.98966 \\ 70 & 675 & -0.20773 & 1.98\times10^8 & 1.2073 & 0.02459 & 0.0102 & 0.01524 & 0.99055 \\ 80 & 675 & -0.22752 & 44324.926 & 1.2752 & 0.02965 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98862 \\ 50 & 1350 & -0.12006 & 168262.8 & 1.12066 & 0.0128 & 0.00105 & 0.02280 & 0.99051 \\ 80 & 1350 & -0.12960 & 1.60\times10^6 & 1.21960 & 0.00158 & 0.00105 & 0.02280 & 0.99051 \\ 60 & 1350 & -0.12960 & 1.60\times10^6 & 1.21960 & 0.00158 & 0.00128 & 0.0162 & 0.99051 \\ 80 & 2025 & -0.13496 & 203675 & 1.13496 & 0.01188 & 0.0128 & 0.02845 & 0.98885 \\ 60 & 2025 & -0.13496 & 203675 & 1.13496 & 0.01715 & 0.00125 & 0.02242 & 0.98851 \\ 70 & 2025 & -0.13496 & 203675 & 1.13496 & 0.01715 & 0.00125 & 0.02242 & 0.98851 \\ 70 & 2025 & -0.19803 & 3.46\times10^7 & 1.19803 & 0.02883 & 0.00169 & 0.01694 & 0.98528 \\ \hline & & & & & & & & & & & & & & & & & &$		50	1350	1.08819	0.01159	-0.02560		0.00119	0.02744	0.98896
Logarithmic 70 1350 1.08093 0.0244 -0.02620 0.00133 0.02001 0.98686 80 1350 1.10341 0.02687 -0.05637 0.00140 0.01542 0.98745 50 2025 1.11113 0.01005 -0.03974 0.00136 0.03125 0.98812 60 2025 1.1047 0.01469 -0.03695 0.00147 0.02784 0.92649 70 2125 1.10085 0.02088 -0.03262 0.00156 0.02500 0.98825 80 2025 1.1520 0.02025 -0.10979 0.00124 0.01560 0.98926 $\frac{a \ k_0 \ b \ k_1}{50}$ $\frac{a \ k_0 \ k_1}{50}$ $a \ k_0 \ k_1$		60	1350	1.06729	0.01989	-0.00645		0.00104	0.02282	0.98868
80 1350 1.10341 0.02687 -0.05637 0.00140 0.01542 0.98745 50 2025 1.11113 0.01005 -0.03974 0.00136 0.03126 0.98812 60 2025 1.10085 0.02088 -0.03695 0.00147 0.02784 0.98649 70 2025 1.10085 0.02025 -0.10979 0.00124 0.01560 0.98926 80 2025 1.15220 0.02025 -0.10979 0.00124 0.01560 0.98926 60 675 -0.14764 79692.434 1.14764 0.01626 0.00199 0.02280 0.98966 70 675 -0.22773 1.98×10 ⁸ 1.20773 0.02459 0.00102 0.01524 0.99055 80 675 -0.22752 44324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01620 0.98662 50 1350 -0.12006 1862.28 1.12006 0.02193 0.00102 0.01624 0.99055 80 675 -0.12752 44324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01620 0.98662 50 1350 -0.12906 1862.28 1.12006 0.01293 0.00105 0.01620 0.98662 50 1350 -0.12906 160×10 ⁹ 1.21960 0.02308 9.98×10 ⁴ 0.01237 0.99129 80 1350 -0.12906 160×10 ⁹ 1.15327 0.01715 0.0128 0.02280 0.99031 50 2025 -0.13892 5.138406 0.0158 0.00128 0.02405 0.98885 60 2025 -0.13892 5.138406 0.0158 0.00128 0.02240 0.98851 60 2025 -0.13892 5.13940 5.15827 0.01715 0.0125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19803 3.34×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.34×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.34×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.34×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.34×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.34×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.34×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.46×10 ¹ 1.9803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.46×10 ¹ 1.9803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.46×10 ¹ 1.9803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19805 8.884×10 ¹ 0.01590 2.50 3.00 4.50 5.50 5.50 5.50 5.50 5.50 5.50 5	Logarithmic	70	1350	1.08093	0.02444	-0.02620		0.00133	0.02001	0.98686
50 2025 1.11113 0.01005 -0.03974 0.00136 0.03125 0.98812 60 2025 1.1047 0.01469 -0.03695 0.00147 0.02784 0.98649 70 2025 1.10085 0.02088 -0.0326 0.00156 0.02500 0.98525 80 2025 1.15200 0.02025 -0.10979 0.00124 0.01360 0.98926 70 675 -0.10273 67028.914 1.10923 0.00943 0.00128 0.03084 0.98884 60 675 -0.12752 44324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01524 0.99856 70 675 -0.22752 44324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01620 0.98620 50 1350 -0.12006 168262.8 1.12006 0.01293 0.00105 0.0123 0.99051 80 675 -0.12752 44324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01620 0.98620 50 1350 -0.12006 168262.8 1.12006 0.01293 0.00105 0.0123 0.99031 70 1350 -0.17949 323946 1.12949 0.02170 6.82210 ⁴ 0.01433 0.99255 80 1350 -0.17949 323946 1.21969 0.03509 9.98×10 ⁴ 0.0123 0.99129 80 1350 -0.15920 1.39×10 ⁴ 1.19520 0.0288 8.84×10 ⁴ 0.01237 0.99129 80 2025 -0.15327 6489691 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 60 2025 -0.15327 6489691 1.15327 0.01715 0.00126 0.02420 0.98852 60 2025 -0.15320 4.39×10 ⁴ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19503 3.36×10 ⁴ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.998518 80 2025 -0.19503 3.36×10 ⁴ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.998518 80 2025 -0.19503 3.36×10 ⁴ 1.19520 0.02495 0.00104 0.01694 0.98528 60 2025 -0.19503 3.36×10 ⁴ 1.19803 0.02288 0.00104 0.01694 0.98528 60 2025 -0.19503 3.36×10 ⁴ 1.19803 0.02288 0.00101 0.01508 0.99851 80 2025 -0.19803 3.36×10 ⁴ 1.19803 0.02288 0.00104 0.01694 0.98528 60 2025 -0.19803 3.36×10 ⁴ 1.19803 0.02288 0.00169 0.01694 0.98528 60 2025 -0.19803 3.36×10 ⁴ 1.19803 0.02288 0.00169 0.01694 0.98528 70 Γ $R_{00}\Gamma$ R_{0		80	1350	1.10341	0.02687	-0.05637		0.00140	0.01542	0.98745
60 2025 1.1047 0.01469 -0.03695 0.00147 0.02784 0.98649 70 2025 1.10085 0.02088 -0.03262 0.00156 0.02500 0.98525 80 2025 1.15200 0.02025 -0.10979 0.00124 0.0156 0.998926 $\frac{a}{b_0}$ $\frac{b}{k_1}$ 0.0124 0.0156 0.98884 0.98884 60 675 -0.1073 1.98×10 ¹ 1.0923 0.00943 0.00128 0.03084 0.98884 60 675 -0.20773 1.98×10 ¹ 1.2073 0.02459 0.00102 0.01524 0.99055 80 675 -0.20773 1.98×10 ¹ 1.2073 0.02459 0.00102 0.01524 0.99055 80 675 -0.20773 1.98×10 ¹ 1.2073 0.02459 0.00102 0.01524 0.99055 80 675 -0.12906 168262.8 1.12066 0.01293 0.00105 0.02303 0.99031 60 1350 -0.1206 168262.8 1.12066 0.01293 0.00105 0.02303 0.99031 60 1350 -0.12960 1.60×10 ⁰ 1.21960 0.0158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.13496 2505675 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.13520 1.39×10 ¹ 1.1527 0.01715 0.00128 0.02805 0.998851 70 2025 -0.13520 1.39×10 ¹ 1.1520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19532 1.39×10 ¹ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19532 1.39×10 ¹ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19532 1.39×10 ¹ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19532 1.39×10 ¹ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19532 1.39×10 ¹ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19532 1.39×10 ¹ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ¹ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 $\frac{a}{b_0 \Gamma} - P_{age} RMM$ $\frac{a}{b_0 \Gamma} - P_{age} RMM$ $\frac{b}{c_0 \Gamma} + b_0 \Gamma} + b_0 \Gamma$ $\frac{b}{c_0 \Gamma} + b_0 \Gamma + b_0 \Gamma$ $\frac{b}{c_0 \Gamma} + b_0 \Gamma + b_0 $		50	2025	1.11113	0.01005	-0.03974		0.00136	0.03125	0.98812
70 2025 1.10085 0.02088 -0.03262 0.00156 0.02500 0.98525 80 2025 1.15200 0.02025 -0.10979 0.00124 0.01360 0.98926 a k_0 b k_1 0.00124 0.0128 0.03084 0.98884 60 675 -0.1073 1.98×10 ⁸ 1.1073 0.00126 0.00109 0.02280 0.98966 70 675 -0.20773 1.98×10 ⁸ 1.20773 0.02459 0.00102 0.01524 0.99955 80 675 -0.22752 4.324.926 1.20753 0.02450 0.00105 0.02303 0.999051 60 1350 -0.14293 111264.2 1.14293 0.02170 6.82×10 ⁴ 0.01433 0.99255 70 1350 -0.1749 323946 1.17949 0.02881 8.84×10 ⁴ 0.01237 0.99107 50 2025 -0.13496 2.503675 1.13527 0.01158 0.00128 0.02805 0.98851 70 2025 -0.15327 6489691 1.15327 <t< td=""><td></td><td>60</td><td>2025</td><td>1.10447</td><td>0.01469</td><td>-0.03695</td><td></td><td>0.00147</td><td>0.02784</td><td>0.98649</td></t<>		60	2025	1.10447	0.01469	-0.03695		0.00147	0.02784	0.98649
80 2025 1.15200 0.02025 -0.10979 0.00124 0.01360 0.98926 a k_0 b k_1 50 675 -0.10923 67028.914 1.10923 0.00943 0.00128 0.03084 0.98884 60 675 -0.20773 1.98.10 ⁶ 1.20773 0.02459 0.00102 0.01524 0.99055 80 675 -0.22752 44324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01620 0.98620 50 1350 -0.1200 168262.8 1.12066 0.00129 0.00105 0.02230 0.99031 60 1350 -0.1293 111264.2 1.14293 0.02170 6.82×10 ⁴ 0.01632 0.99051 80 1350 -0.1296 1.60×10 ⁶ 1.21960 0.03509 9.98×10 ⁴ 0.00998 0.99107 50 2025 -0.13496 2503675 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.15327 6489691 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19520 1.39×10 ⁶ 1.19520 0.02495 0.00169 0.01604 0.98528 c r_{ge}^{*}		70	2025	1.10085	0.02088	-0.03262		0.00156	0.02500	0.98525
$Two-term \begin{cases} x_0 & b & k_1 \\ 50 & 675 & -0.10923 & 67028.914 & 1.10923 & 0.00943 & 0.00128 & 0.03084 & 0.98884 \\ 60 & 675 & -0.2773 & 1.98\times10^8 & 1.20773 & 0.02459 & 0.00102 & 0.01524 & 0.99055 \\ 80 & 675 & -0.22752 & 44324.926 & 1.22752 & 0.02965 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 50 & 1350 & -0.12006 & 168262.8 & 1.12006 & 0.01233 & 0.00105 & 0.02303 & 0.99031 \\ 60 & 1350 & -0.1293 & 111264.2 & 1.14293 & 0.02170 & 6.82\times10^4 & 0.01433 & 0.99255 \\ 70 & 1350 & -0.12960 & 1.60\times10^6 & 1.21960 & 0.03509 & 9.98\times10^4 & 0.00998 & 0.99107 \\ 50 & 2025 & -0.13426 & 2503675 & 1.13496 & 0.01188 & 0.00128 & 0.02805 & 0.98885 \\ 60 & 2025 & -0.15327 & 6489691 & 1.15327 & 0.01715 & 0.00125 & 0.02845 & 0.98885 \\ 70 & 2025 & -0.15327 & 6489691 & 1.15327 & 0.01715 & 0.00128 & 0.02805 & 0.98885 \\ 70 & 2025 & -0.15327 & 6489691 & 1.15327 & 0.01715 & 0.00128 & 0.02805 & 0.98885 \\ 70 & 2025 & -0.15327 & 6489691 & 1.15327 & 0.01715 & 0.00128 & 0.02805 & 0.98885 \\ 70 & 2025 & -0.19303 & 3.46\times10^7 & 1.19803 & 0.02883 & 0.00169 & 0.01694 & 0.98528 \\ \hline & & & & & & & & & & & & & & & & & &$		80	2025	1.15200	0.02025	-0.10979		0.00124	0.01360	0.98926
50 675 -0.10923 67028.914 1.10923 0.00943 0.00128 0.03084 0.98884 60 675 -0.14764 79692.434 1.14764 0.01626 0.00109 0.02280 0.98966 70 675 -0.22752 4.4324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01524 0.99055 80 675 -0.22752 4.4324.926 1.22752 0.02965 0.00162 0.01620 0.98620 50 1350 -0.12006 16826.8 1.12006 0.01293 0.00105 0.02303 0.99031 60 1350 -0.12960 1.60.10 ⁶ 1.21960 0.03509 9.98810 ⁴ 0.01433 0.99255 70 1350 -0.12960 1.60.10 ⁶ 1.21960 0.03509 9.9881 0.4 0.01237 0.99129 80 1350 -0.21960 1.60.10 ⁶ 1.21960 0.03509 9.9881 0.4 0.01237 0.99129 80 1350 -0.21960 1.60.10 ⁶ 1.1327 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.13496 25036.75 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.15327 64896.91 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19520 1.39×10 ⁶ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 $50 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \$				а	k_0	b	k_1			
60 675 -0.14764 79692.434 1.14764 0.01626 0.00109 0.02280 0.98966 70 675 -0.20773 1.98×10 ⁸ 1.20773 0.02459 0.00102 0.01524 0.99055 80 675 -0.22752 44324.926 1.22752 0.02965 0.00102 0.01620 0.98620 50 1350 -0.12006 168262.8 1.12006 0.01233 0.02303 0.99031 60 1350 -0.12940 1.1124.2 1.14293 0.02170 6.82×10 ⁴ 0.01237 0.99129 80 1350 -0.12940 1.60×10 ⁶ 1.21960 0.0128 0.002805 0.99885 60 2025 -0.1327 64896.91 1.1527 0.01715 0.00128 0.02805 0.998851 70 2025 -0.19520 1.395 1.19520 0.02455 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169		50	675	-0.10923	67028.914	1.10923	0.00943	0.00128	0.03084	0.98884
Two-term $\begin{bmatrix} 70 & 675 & -0.20773 & 1.98 \times 10^8 & 1.20773 & 0.02459 & 0.00102 & 0.01524 & 0.99055 \\ 80 & 675 & -0.22752 & 44324.926 & 1.22752 & 0.02965 & 0.00162 & 0.01620 & 0.98620 \\ 50 & 1350 & -0.12006 & 168262.8 & 1.12006 & 0.01293 & 0.00105 & 0.02303 & 0.99031 \\ 60 & 1350 & -0.14293 & 111264.2 & 1.14293 & 0.02170 & 6.82\times 10^{-4} & 0.01433 & 0.99255 \\ 70 & 1350 & -0.17949 & 323946 & 1.17949 & 0.02881 & 8.84\times 10^{-4} & 0.01237 & 0.99129 \\ 80 & 1350 & -0.21960 & 1.60\times 10^6 & 1.21960 & 0.03509 & 9.98\times 10^{-4} & 0.00998 & 0.99107 \\ 50 & 2025 & -0.13496 & 25036.75 & 1.13496 & 0.01158 & 0.00128 & 0.02805 & 0.98885 \\ 60 & 2025 & -0.19520 & 1.39\times 10^8 & 119520 & 0.02495 & 0.00101 & 0.01508 & 0.99051 \\ 80 & 2025 & -0.19803 & 3.46\times 10^7 & 1.19803 & 0.0283 & 0.00169 & 0.01694 & 0.98528 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0169 & 0.01694 & 0.98528 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0$		60	675	-0.14764	79692.434	1.14764	0.01626	0.00109	0.02280	0.98966
80 675 -0.22752 44324.926 1.2752 0.02965 0.00162 0.01620 0.98620 50 1350 -0.12006 168262.8 1.12066 0.01293 0.00105 0.02303 0.99031 60 1350 -0.1293 111264.2 1.14293 0.02170 6.82×10^{-4} 0.01433 0.99255 70 1350 -0.17949 323946 1.17949 0.02818 8.84×10^{-4} 0.01237 0.99129 80 1350 -0.21960 1.60 \times 10^{5} 1.12160 0.03509 9.98 \times 10^{-4} 0.00998 0.99107 50 2025 -0.13496 25036.75 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98851 70 2025 -0.19520 1.39 \times 10^8 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46 \times 10^7 1.19803 0.02833 0.00169 0.01694 0.98528 70 0^{-5} 0^{-5} 0^{-5} 0^{-5} 0^{-5} 0^{-5} 0^{-5} 0^{-5} 0^{-5} <		70	675	-0.20773	1.98×10^{8}	1.20773	0.02459	0.00102	0.01524	0.99055
Two-term 50 1350 -0.12006 168262.8 1.12006 0.01293 0.00105 0.02303 0.99031 60 1350 -0.1293 111264.2 1.14293 0.02170 6.82×10 ⁴ 0.01433 0.99255 70 1350 -0.17949 323946 1.17949 0.02881 8.84×10 ⁴ 0.01237 0.99129 80 1350 -0.21960 1.60×10 ⁶ 1.21960 0.03509 9.98×10 ⁴ 0.00998 0.99107 50 2025 -0.1327 64896.91 1.15327 0.0115 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19520 1.3 50 1.1496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.19520 1.3 50 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 50 C 50 C 50 C 70 C 50 C 70 C		80	675	-0.22752	44324.926	1.22752	0.02965	0.00162	0.01620	0.98620
Two-term 60 1350 -0.14293 111264.2 1.14293 0.02170 6.82×10^4 0.01433 0.99255 70 1350 -0.17949 323946 1.17949 0.02881 8.84×10^4 0.01237 0.99129 80 1350 -0.21960 1.60×10^6 1.21960 0.03509 9.98×10^{-4} 0.00998 0.99107 50 2025 -0.13496 25036.75 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.15327 64896.911 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19803 3.46×10^7 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 0000 50 °C 0.0256 0.00169 0.01694 0.98528 0000 50 °C 0.00169 0.01694 0.98528 0000 50 °C 0.00169 0.01694 0.98528 0000 50 °C 0.00150 0.001694 0.98528 </td <td></td> <td>50</td> <td>1350</td> <td>-0.12006</td> <td>168262.8</td> <td>1.12006</td> <td>0.01293</td> <td>0.00105</td> <td>0.02303</td> <td>0.99031</td>		50	1350	-0.12006	168262.8	1.12006	0.01293	0.00105	0.02303	0.99031
100-term 70 1350 -0.17949 323946 1.17949 0.02881 8.84×10 ⁴ 0.01237 0.99129 80 1350 -0.21960 1.60×10 ⁶ 1.21960 0.03509 9.98×10 ⁴ 0.00998 0.99107 50 2025 -0.13496 25036.75 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.15327 64896.91 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19520 1.39×10 ⁸ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 c 1.1900 .002883 0.00169 0.01694 0.98528 c 1.19803 .002883 0.00169 0.01694 0.98528 c 1.19803 .002833 0.00169 0.01694 0.98528 c 1.19803 .002833 .00169 0.1694 0.98528 <td colspan="4</td> <td>T</td> <td>60</td> <td>1350</td> <td>-0.14293</td> <td>111264.2</td> <td>1.14293</td> <td>0.02170</td> <td>6.82×10⁻⁴</td> <td>0.01433</td> <td>0.99255</td>	T	60	1350	-0.14293	111264.2	1.14293	0.02170	6.82×10 ⁻⁴	0.01433	0.99255
80 1350 -0.21960 1.60×10 ⁶ 1.21960 0.03509 9.98×10 ⁴ 0.00998 0.99107 50 2025 -0.13496 25036.75 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.15327 64896.91 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19520 1.39×10 ⁶ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 $\frac{50 \ C}{70 \ C}}$ 80 C $-Page figmt d$ $\frac{50 \ C}{100}$ 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 T \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	1wo-term	70	1350	-0.17949	323946	1.17949	0.02881	8.84×10 ⁻⁴	0.01237	0.99129
50 2025 -0.13496 25036.75 1.13496 0.01158 0.00128 0.02805 0.98885 60 2025 -0.15327 64896.91 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19520 1.39×10 ³ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 0		80	1350	-0.21960	1.60×10^{6}	1.21960	0.03509	9.98×10 ⁻⁴	0.00998	0.99107
60 2025 -0.15327 64896.91 1.15327 0.01715 0.00125 0.02242 0.98851 70 2025 -0.19520 1.39×10 ⁸ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 0 50 0 60 0 50 0 50 0 60 0 70		50	2025	-0.13496	25036.75	1.13496	0.01158	0.00128	0.02805	0.98885
70 2025 -0.19520 1.39×10 ³ 1.19520 0.02495 0.00101 0.01508 0.99051 80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 0 60 °C 70 °C 50 °C 60 °C 70 °C 60 °C 70 °C 80 °C - Page f838/ú 0 50 °C - Page f838/ú - Page f838/ú - Page f838/ú - Page f838/ú 0		60	2025	-0.15327	64896.91	1.15327	0.01715	0.00125	0.02242	0.98851
80 2025 -0.19803 3.46×10 ⁷ 1.19803 0.02883 0.00169 0.01694 0.98528 0 -0		70	2025	-0.19520	1.39×10 ⁸	1.19520	0.02495	0.00101	0.01508	0.99051
0 50 ℃		80	2025	-0.19803	3.46×10 ⁷	1.19803	0.02883	0.00169	0.01694	0.98528
000 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 Tgkptin min Tgkptin min Tgkptin min Tgkptin min Tgkptin Tgkptin min Tgkptin Tgkptin <t< td=""><td></td><td>L.</td><td></td><td>■ 50 ℃ ● 60 ℃ ▲ 70 ℃ ▼ 80 ℃ ── Page</td><td>预测值</td><td>u 水分比</td><td>1.0 0.8 0.6 0.4</td><td><u>\</u></td><td></td><td> 50 ℃ 60 ℃ 70 ℃ 80 ℃ Page预测值 </td></t<>		L.		■ 50 ℃ ● 60 ℃ ▲ 70 ℃ ▼ 80 ℃ ── Page	预测值	u 水分比	1.0 0.8 0.6 0.4	<u>\</u>		 50 ℃ 60 ℃ 70 ℃ 80 ℃ Page预测值
0.0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 150 100 150 200 250 300 350 400 450 500 50 100 150 100 150	²	<u>``</u>					0.2			
 b) 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 干燥时间/min b) 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 干燥时间/min b) 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 干燥时间/min b) 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 干燥时间/min b) 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 T (k) 100 150 200 250 300 150 100 100 100 100 100 100 100 100 1							0.0			
 S0 で 50 で 50 で 70 で 80 で Page 預測値 S0 で 70 で 80 で 80 で 90 で 90 で 90 で 80 で 90 で	0 50 100	150 200	250 300 干燥时间 /	350 400 450 min	500 550		0 50 1	00 150 200 2 干板	250 300 350 时间/min	400 450 500 550
 60°C 70°C 80°C Page预测值 Fig.3 Comparison of the predicted values by the Page mode and experimental values of moisture ratio with varying time a different drying conditions 注: a 功率为 675 W; b 功率为 1350W; c 功率为 2025 W 2.3 Page 模型的求解 由表 2 可知. Page 模型更适合用于描述猕猴桃切 	1.0	-		 50 °C 	2	[4	图 3 不同干燥	操条件下 Page	e 模型预测化	直与试验值比较
 80 °C Page预测值 Ad Ad				 60 ℃ ▲ 70 ℃ 	3	Fig 3	Compariso	n of the pred	icted values	by the Page mode
0.6 different drying conditions 1.2 iiii (a 功率为 675 W; b 功率为 1350W; c 功率为 2025 W) 2.3 Page 模型的求解 由表 2 可知. Page 模型更适合用于描述猕猴桃切				▼ 80 ℃ — Page) 預測值	and e	vnerimenta	l values of mo	isture ratio v	vith varving time a
14 注: a 功率为 675 W; b 功率为 1350W; c 功率为 2025 W 12 2 10 1350W; c 功率为 2025 W 11 1350W; c 功率为 2025 W 12 1350W; c 功率为 2025 W 13 1350W; c 功率为 2025 W 14 14 15 15 16 15 17 15 18 15 19 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15 10 15	different drving conditions							ne		
12 1350W: 0347/1550W: 0347/150W: 0347/1550W: 0347/150W: 0347/150000000000000000000000000000							注,自动家生	1 675 W. h +	mg collui10	1.。· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
由表2可知.Page 模型更适合用于描述猕猴桃切						2.3	Page 模	型的求解	- <i>+</i> № 1350W	α, C -71 + 79 2023 ₩
							由表2可4	印,Page 植	型更话合田	目干描试猕猴桃出

0.0 0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 干燥时间 / min

片的中短波红外干燥。模型中的k和n是干燥温度和

功率的函数,采用二次多项式来拟合 Page 方程中的干燥常数,除了考虑每个独立变化因素的一次和二次作用外,还需考虑各个因素之间的交互作用。设定

$$k = a_0 + a_1 T + a_2 P + a_3 T P + a_4 T^2 + a_5 P^2$$
(8)

$$n = b_0 + b_1 T + b_2 P + b_3 T P + b_4 T^2 + b_5 P^2$$
(9)

对以上两方程进行回归分析,分别求出 Page 模型中参数 *k* 和 *n* 的回归方程,结果如下:

$$k = -0.0185 + 4.09175 \times 10^{-4} T + 9.68312 \times 10^{-6} P \quad (10)$$
$$R^{2} = 0.93$$

$$n = 1.2797 + 0.00211T - 1.24735 \times 10^{-4}P \tag{11}$$

 $R^2 = 0.889$

将式(7)和(8)代入 Page 模型中,得到

 $MR = \exp[-0.0185 + 4.09175 \times 10^{-4}T + 9.68312 \times 10^{-6}P)$

 $t^{(1.2797+0.00211T-1.24735\times10^{-4}P)}$ (12)

2.4 Page 模型的验证

选取干燥温度为 65 ℃、功率为 1575 W 的干燥条 件下猕猴桃切片中短波红外干燥试验值和 Page 模型 预测值进行验证比较,如图 4 所示,可以看出,试验 值和预测值的一致性较好,模型能够预测猕猴桃切片 中短波红外水分变化规律。

2.5 猕猴桃切片中短波红外干燥水分有效力

散系数和活化能

由图1和图2可知,整个过程除了开始阶段的短暂升速,主要过程属于降速阶段控制,因此干燥过程



Fig.4 Comparison of the predicted values by the Page model and experimental values of moisture ratio with varying time at the drying temperature of 65 °C and power of 1575 W

值比较

由公式(7)可知:猕猴桃切片在干燥过程中的水分 比的自然对数值 mMR 随着干燥时间 t 呈线性关系,通 过回归计算出猕猴桃切片不同干燥温度下水分有效扩 散系数 D_{ef} 如表 3 所示。由表 3 可知,猕猴桃切片的 水分有效扩散系数随着干燥温度的升高而升高。此外, 干燥功率的增加,水分有效扩散系数也加大。当干燥 功率为 675 W,干燥温度分别为 50、60、70 和 80 ℃ 时,猕猴桃切片的水分有效扩散系数分别为 3.3970×10⁹~1.2229×10⁸ m²/s;当干燥功率为 1350 W, 干燥温度分别为 50、60、70 和 80 ℃时,猕猴桃切片 的水分有效扩散系数分别为 4.0020×10⁹~1.2603×10⁸ m²/s;当干燥功率为 2025 W,干燥温度分别为 50、60、 70 和 80 ℃时,猕猴桃切片的水分有效扩散系数分别 为 4.6970×10⁹~1.2960×10⁻⁸ m²/s。

表 3 不同干燥温度和功率下猕猴桃切片中短波红外干燥水分有效扩散系数

Table 2 Mainteres	offe attan	J: CC		Jan Jtffanand	J	4 • • • • • • • • • • 4 • • • • •	J
Table 5 Moisture	enecuve	allusivity of l	kiwiiruit siices	under amerent	arying	temperature	and power

		•	• • •	
干燥功率/W	干燥温度/℃	线性回归拟合方程	决定系数 R ²	有效扩散系数 Deff
675	50	ln <i>MR</i> =-0.01006 <i>t</i> +0.04898	0.95491	3.3970×10 ⁻⁹
675	60	ln <i>MR</i> =-0.01245 <i>t</i> -0.35820	0.87565	4.0760×10 ⁻⁹
675	70	ln <i>MR</i> =-0.02161 <i>t</i> -0.14966	0.92088	7.1340×10 ⁻⁹
675	80	ln <i>MR</i> =-0.03662 <i>t</i> +0.33955	0.97505	1.2229×10 ⁻⁸
1350	50	$\ln MR = -0.01178t$	0.94433	4.0020×10 ⁻⁹
1350	60	ln <i>MR</i> =-0.01668 <i>t</i> -0.06013	0.92620	5.6660×10 ⁻⁹
1350	70	lnMR=-0.02211t-0.16637	0.91603	7.5110×10 ⁻⁹
1350	80	ln <i>MR</i> =-0.01178 <i>t</i> +0.37138	0.97380	1.2603×10 ⁻⁸
2025	50	ln <i>MR</i> =-0.01391 <i>t</i> -0.25741	0.89665	4.6970×10 ⁻⁹
2025	60	lnMR=-0.019951t-0.81969	0.89278	6.7370×10 ⁻⁹
2025	70	ln <i>MR</i> =-0.023138 <i>t</i> -0.30079	0.89647	7.8130×10 ⁻⁹
2025	80	ln <i>MR</i> =-0.03838 <i>t</i> +0.11964	0.96326	1.2960×10 ⁻⁸
	八古海扩盐至粉的	内白妹对朱		

由等式(7)可知水分有效扩散系数的自然对数

 $\ln D_{eff}$ 与<u>1</u> <u>7+273.15</u>呈线性关系,其斜率为_<u> E_a </u>,二者

[7]



图 5 水分有效扩散系数与干燥温度的关系曲线

Fig.5 The relation curves of moisture effective diffusion



其干燥功率为 675、1350 和 2025W 下的直线回归 方程分别为 Y=-4997.75X-4.1529 (R²=0.9506)、 Y=-4232.60X-6.2757 (R²=0.9764)、Y=-3636.93X-7.9376 (R²=0.9538) 经计算得到其活化能分别为 41.551、35.189 和 30.23 kJ/mol,说明干燥过程干燥功 率为 675、1350 和 2025 W 中从猕猴桃切片中去除 1 mol 的水分需要的最低的能量分别为 41.551、35.189 和 30.237 kJ,功率越大,所需能量越低。

3 结论

3.1 猕猴桃切片中短波红外干燥过程中,干燥温度和 干燥功率对猕猴桃切片干燥速率的均有影响较显著, 但干燥温度对干燥速率的影响比干燥功率更为突出, 干燥时间随着干燥温度和干燥功率的升高而降低。
3.2 在试验范围内,Page模型对干燥过程的拟合性最好,通过确定模型的相关参数与干燥温度和功率的函数关系式,能准确预测不同时刻的猕猴桃水分比的变化。

3.3 猕猴桃切片的中短波红外干燥主要由降速阶段 控制,在试验范围内水分有效扩散系数随着干燥温度 的提高而增大,其范围为 3.3970×10⁹~1.2960×10⁸ m²/s,猕猴桃切片中短波红外干燥活化能在功率为 675、1350和 2025 W 时,其值分别为 41.551、35.189 和 30.237 kJ/mol。

参考文献

[1] 李加兴,孙金玉,陈双平,等.猕猴桃综合加工利用[J].食品科 学,2006,27(11):575-578

Li Jia Xing, Sun Jin Yu, Chen Shuang Ping, et al. Kiwifruit comprehensive processing utility [J]. Food Science, 2006, 27(11): 575-578

[2] 高愿军,郝莉花,张鑫,等.猕猴桃汁维生素C降解动力学的研

究[J].农业工程学报,2006,22(5):157-160

Gao Yuan Jun, Hao Li Hua, Zhang Xin, et al. Degradation kinetics of ascorbic acid in kiwifruit juice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 157-160

- [3] 彭帮柱,岳田利,袁亚宏,猕猴桃切片真空冷冻干燥工艺参数 优化[J].农业机械学报,2007,38(4):98-102
 Peng Bang Zhu, Yue Tian Li, Yuan Ya Hong. Optimization of Technical Parameters on Vacuum Freeze-dry Kiwifruit Slice
 [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(4):98-102
- [4] 周国燕,陈唯实,叶秀东,等.猕猴桃热风干燥与冷冻干燥的实验研究[J].食品科学,2007,28(8):164-167
 Zhou Guo Yan, Chen Wei Shi, Ye Xiu shi, et al. Study on freeze-drying and hot-air drying kiwifruit slice [J]. Food Science, 2007, 28(8):164-167
- [5] 李汴生,刘伟涛,李丹丹,等糖渍加应子的热风干燥特性及其 表达模型[J].农业工程学报,2009,25(11):330-335
 - Li Bian Sheng, Liu Wei Tao, Li Dan Dan, et al. Characteristic of hot air drying of candied prunes and representation model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 330-335
- [6] Sharma G P, Verma R C, Pathare P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71: 282-286

高云.中短波红外辐射技术在工业加热中的运用[C].第十三 届全国红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要 集,2011

Gao Yun. The use of med-shortwave infrared radiation technology in industrial heating [C]. The 13th national infrared heating and infrared medical development seminar papers and abstract sets

- [8] Wang Z F, Sun J H, Liao X J, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40: 39-46
- [9] Crank J. The mathematics of diffusion [M]. Oxford, England: Clarendon Press, 1975
- [10] Celma A R, López-Rodríguez F, Blázquez F C. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by -products [J].
 Food and Bioproducts Processing, 2009, 87(4): 247-253
- [11] Doymaz İ. Infrared drying of sweet potato (Ipomoea batatas L.) slices [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(6): 760-766
- [12] Kocabiyik H, Tezer D. Drying of carrot slices using infrared radiation [J]. International Journal of Food Science &

现代食品科技

Modern Food Science and Technology

2014, Vol.30, No.1

Technology, 2009, 44(5): 953-959

- [13] Luampon R, Theerakulpisut S, Artnaseaw A. Thin Layer Drying of Carrot Slices by Heat Pump Vacuum Dryer [J]. Advanced Science Letters, 2013, 19(11): 3342-3345
- [14] Tunde-Akintunde T Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper [J]. Renewable Energy, 2011, 36(8):2139-2145