doi:10.12301/j.issn.2095-6002.2021.01.005　　文章编号:2095-6002(2021)01-0046-08
引用格式:陈建福, 汪少芸, 林梅西. 白玉菇中短波红外干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学技术学报,2021,39(1):46 - 53.
CHEN Jianfu, WANG Shaoyun, LIN Meixi. Drying characteristics and kinetics model of white *Hypsizygus Marmoreus* with medium and short wave infrared radiation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021,39(1):46 - 53.

白玉菇中短波红外干燥特性及动力学模型

陈建福[1,2,3], 汪少芸[2,*], 林梅西[3]
(1. 漳州职业技术学院 食品工程学院, 福建 漳州 363000;
2. 福州大学 生物科学与工程学院, 福建 福州 350108;
3. 福建省闽中有机食品有限公司, 福建 莆田 351100)

摘　要: 为提高白玉菇的货架期,采用中短波红外线对白玉菇进行干燥,考察了干燥温度(60、70、80、90 ℃)和干燥功率(675、900、1 125、1 350 W)对白玉菇干燥特性的影响,并通过 7 种常用的农产品干燥模型对干燥过程进行了拟合,建立了白玉菇中短波红外干燥的动力学模型。研究结果表明:干燥温度和干燥功率对白玉菇的干燥过程均有影响,但干燥温度对干燥过程影响更大,干燥温度越高,干基含水率下降越明显。白玉菇干燥过程由内部水分扩散控制,降速阶段为主要阶段。Page 模型的预测值与实验值具有较高的拟合度,能够较准确地反映白玉菇红外干燥过程,可以用来定量描述不同干燥温度和不同干燥功率下白玉菇的红外干燥过程规律。固定干燥功率为 1 125 W 时,水分有效扩散系数随着干燥温度的升高而增大,当干燥温度从 60 ℃升高到 90 ℃时,水分有效扩散系数从 2.723×10^{-9} m^2/s 升高到 9.088×10^{-9} m^2/s;固定干燥温度为 70 ℃时,水分有效扩散系数随着干燥功率的升高而增大,当干燥功率从 675 W 增加到 1 350 W 时,水分有效扩散系数从 4.847×10^{-9} m^2/s 升高到 5.243×10^{-9} m^2/s。白玉菇中短波红外干燥活化能为 39.45 kJ/mol。本研究旨在对白玉菇的中短波红外干燥工艺设计、设备选型及生产控制提供理论参考。

关键词: 白玉菇; 中短波红外线; 干燥温度; 干燥功率; 动力学模型
中图分类号: TS219; S375　　**文献标志码:** A

白玉菇(white *Hypsizygus marmoreus*)又名白雪菇、白玉蕈等,是真姬菇的白色变种,是一种木腐型食用菌[1]。白玉菇菇体洁白、鲜滑、质地细腻,含有多糖、维生素、氨基酸和矿物元素等多种有效成分,具有抗炎、抗辐射、抗氧化、降血糖血脂和提高免疫力等多种生物生理活性[2-3]。新鲜白玉菇含水量较高,生理活动旺盛,采后易失水、软化、褐变及滋生细菌而失去商品价值,从而影响货架期,制约白玉菇产业的发展[4]。食用菌的干制可以使食用菌的含水量和水分活度降低,抑制食用菌体内微生物繁殖和钝化酶活性,以延长货架期[5]。中短波红外干燥是近几年农产品干燥过程中新兴的一种加工技术,相比传统干燥方式,具有穿透性强,加热迅速、均匀,节能等优点,可大大提高农产品的干燥效率,延长货架期,还能保持农产品的色泽,改善农产品品质。李聪等[6]利用热风和中短波红外线对桃渣的干燥特性进行了研究,结果表明:在相同的干燥温度下,红外干燥得到的样品具有较高的总酚保留率;在所考察的工艺范围内,干燥速率越大,总酚保留率越高,干燥温度越高,多酚含量越大。司旭等[7]采用不同的

收稿日期: 2019 - 08 - 22
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31771922); 福建省科技计划资助项目(2018N2002)。
第一作者: 陈建福,男,副教授,博士,主要从事食品应用化学方面的研究。
*通信作者: 汪少芸,女,教授,博士,主要从事食品生物化学方面的研究。

红外干燥条件对树莓的干燥特性和品质进行了研究，结果表明：树莓的产品色泽在干燥温度为 70 ℃，功率为 675 W 时保持最好，复水比较高，此时花青素的保留率也较高，产品对 ABTS 和 DPPH 自由基具有较强的清除能力。目前对白玉菇进行中短波红外干燥方面的研究还比较少，本研究拟采用中短波远红外线对白玉菇进行干燥，探讨干燥温度和干燥功率对白玉菇的干燥特性的影响，建立白玉菇中短波红外干燥动力模型，以期为白玉菇干燥产业发展提供理论依据和技术指导。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

新鲜白玉菇购于漳州市芗城区北桥市场。将原包装袋一起存放于(4 ± 1)℃冷藏冰箱中，挑选大小一致的白玉菇作为实验材料。

1.2　仪器与设备

SAK－ZG－WO700 型红外线箱式干燥机，泰州圣泰科红外科技有限公司；DHG－9070A 型电热恒温鼓风干燥箱，上海精宏实验设备有限公司；AR 224CN 型电子分析天平，奥豪斯仪器(上海)有限公司。

1.3　实验方法

1.3.1　白玉菇含水量的测定

称取质量为 100 ~ 120 g 新鲜白玉菇，将其平铺于 105 ℃的恒温干燥箱中干燥。称量白玉菇干燥到恒重时的质量，计算白玉菇的干基含水率为 12.075 4 g/g，湿基含水率为 92.35%。

1.3.2　红外干燥过程

称取 100 ~ 120 g 的新鲜白玉菇，平铺到已设定好温度和功率的中短波红外干燥箱中，物料厚度为单层 0.008 m。在预实验的基础上，固定干燥功率为 1 125 W，考察不同干燥温度(60、70、80、90 ℃)对白玉菇干燥特性的影响；固定干燥温度为 70 ℃，考察不同干燥功率(675、900、1 125、1 350 W)对白玉菇干燥特性的影响。每隔 20 min 测定白玉菇质量变化，直至干基含水率小于 0.16 g/g 后，停止干燥。

1.4　实验指标计算方法

1.4.1　水分比计算

白玉菇中未被干燥脱去的水分可以用水分比(moisture ratio，MR)表示。水分比是白玉菇干燥速率快慢的指标，计算方法见式(1)。

$$MR = \frac{M_i - M_e}{M_0 - M_e} \quad 。 \tag{1}$$

式(1)中：MR，水分比；M_e，白玉菇干燥平衡时的干基含水率，g/g；M_0，白玉菇的初始干基含水率，g/g；M_i，第 i 次干燥时的干基含水率，g/g。因 M_e 较小，将方程简化为式(2)。

$$MR = \frac{X_i}{X_0} \quad 。 \tag{2}$$

1.4.2　干燥速率计算

不同干燥时刻白玉菇的干燥速率公式，见式(3)。

$$DR = \frac{m_1 - m_2}{t_2 - t_1} \quad 。 \tag{3}$$

式(3)中：DR，白玉菇的干燥速率，g/min；m_1，t_1 时刻白玉菇的干基含水率，g/g；m_2，t_2 时刻白玉菇的干基含水率，g/g；t_1 和 t_2，分别为干燥时间，min。

1.5　干燥动力学模型的建立

利用 7 种常见的农产品薄层干燥模型(见表 1)对白玉菇的干燥过程进行拟合，用决定系数 R^2、卡方检验值 χ^2 和标准误差 RMSE 对模型的拟合程度进行评价，其中 R^2 越大、χ^2 和 RMSE 越小，则拟合度越好。

表 1　薄层干燥模型

Tab. 1　Model of thin-layer drying

序号	模型名称	指数方程式	参考文献
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[8]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[9]
3	Henderson and Pabis	$MR = a\exp(-kt)$	[10]
4	Logarithmic	$MR = a\exp(-kt) + c$	[11]
5	Approximation of diffusion	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	[12]
6	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[13]
7	Simplified Fick's Diffusion	$MR = a\exp(-ct/L^2)$	[14]

a，b，c，n，L，k 为待定系数。

1.6　水分有效扩散系数计算

Fick 扩散方程可以用来描述受内部水分扩散控制的降速干燥过程[15]。当物料具有相同初始含水率时，Fick 扩散方程可简化为式(4)。

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L_0^2} \quad 。 \tag{4}$$

式(4)中：D_{eff}，水分有效扩散系数，m^2/s；t，干燥时间，min；L_0 表示白玉菇层高的一半，m。

从式(4)中,可得 ln*MR* 与干燥时间 *t* 呈线性函数关系,通过线性方程斜率 *B*,可计算得 D_{eff},见式(5)。

$$B = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L_0^2} \quad 。 \tag{5}$$

1.7 活化能计算

白玉菇干燥过程中的 D_{eff}可通过阿伦尼乌斯公式(Arrhenius equation)与干燥温度(*t*)建立关系,见式(6)。

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(t+273.15)}\right]。 \tag{6}$$

式(6)中:D_0,指前因子;E_a,活化能,J/mol;*R*,摩尔气体常数,8.314 J/(mol·K);*t*,干燥温度,℃。

将式(6)两边取自然对数,得式(7),即可通过方程斜率求得干燥活化能。

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT_a} \quad 。 \tag{7}$$

2 结果与分析

2.1 白玉菇的红外干燥特性分析

2.1.1 干燥温度对白玉菇干燥特性的影响

图 1 和图 2 为干燥功率固定为 1 125 W 时,干燥温度对白玉菇红外干燥过程中干基含水率和干燥速率的影响。从图 1 中可知,同一干燥温度下,随着干燥时间的延长,白玉菇的干基含水率均逐渐下降,干燥温度越高,干基含水率下降越明显。当干燥温度分别为 60、70、80、90 ℃时,白玉菇的干燥时间分别为 180、100、80、60 min。当干燥时间为 60 min 时,60、70、80、90 ℃干燥温度下白玉菇的干基含水率分别为 1.826 3、0.403 7、0.173 1、0.087 0 g/g,说明干基含水率与干燥温度呈负相关,这是因为随着干燥温度的升高,降低了热空气的相对湿度,增加了热空气的水蒸气容量;同时温度的升高也提高了白玉菇与热空气之间的对流强度,强化了物料内部水分的迁移与扩散,提高了白玉菇中的水分蒸发量[16]。由图 2 的干燥速率曲线可知,干燥初期,白玉菇的干燥速率急剧增加,在 20 min 时达到最大,随后干燥速率均又开始急剧下降,最后趋于平稳。可见白玉菇的干燥过程主要为加速和降速两个阶段,没有明显的恒速阶段,其中降速为主要阶段。这是因为干燥初期白玉菇水分含量较高,随着温度的升高,水分蒸发量加大,干燥速率迅速增大,但随着白玉菇表面水分的蒸发,白玉菇表面逐渐变硬,水分扩散至表面的速率小于表面水分汽化速率,干燥速率逐渐降低[17],说明白玉菇红外干燥由内部水分扩散控制。

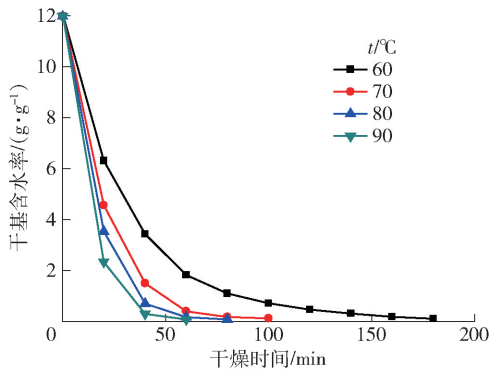

图 1 干燥温度对白玉菇干基含水率的影响

Fig. 1 Effect of drying temperature on moisture content of dry basis of white *Hypsizygus marmoreus*

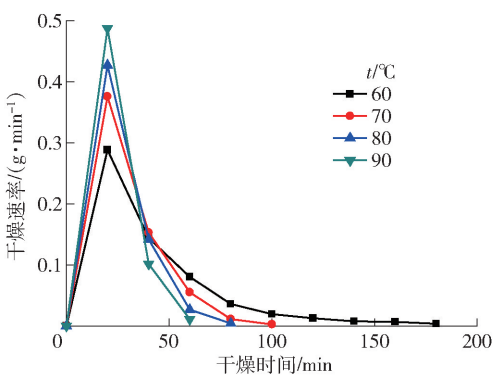

图 2 干燥温度对白玉菇干燥速率的影响

Fig. 2 Effect of drying temperatures on drying rate of white *Hypsizygus marmoreus*

2.1.2 干燥功率对白玉菇干燥特性的影响

图 3 和图 4 为干燥温度固定为 70 ℃时,干燥功率对白玉菇红外干燥过程中干基含水率和干燥速率的影响。从图 3 中可知,在干燥功率分别为 675、900、1 125、1 350 W 时,干燥时间均为 100 min,干基含水量对应为 0.143 2、0.137 3、0.127 1、0.117 8 g/g。说明干燥功率对白玉菇的干燥有一定的影响,这是因为在一定的干燥功率范围内,红外波能快速地渗透到白玉菇内部,促进白玉菇升温,加快物料内部水分的蒸发;然而由于白玉菇的水分有限,在快速的干燥过程中,来不及辨别干燥功率的作用大小,造成干燥功率对白玉菇干燥影响较小的表象[18]。由图 4 的干燥速率曲线可知,降速阶段是干燥的主要阶段,说明内部水分扩散控制着干燥过程。由图 1 至图 4 可知,干燥温度和干燥功率对白玉菇的干燥过程均有

影响，但干燥温度对干燥过程影响更大。

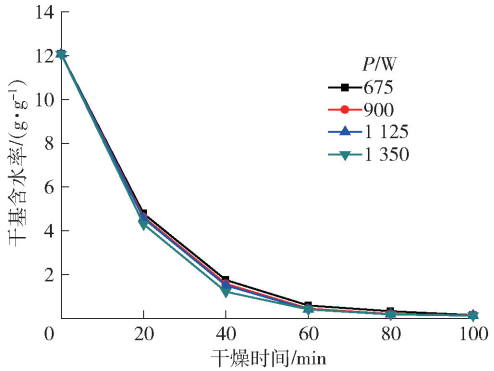

图 3　干燥功率对白玉菇干基含水率的影响

Fig. 3　Effect of drying power on moisture content of dry basis of white *Hypsizygus marmoreus*

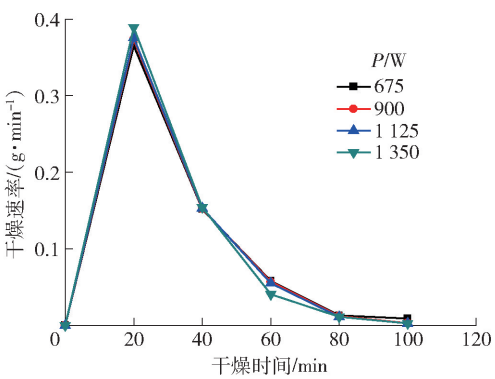

图 4　干燥功率对白玉菇干燥速率的影响

Fig. 4　Effect of drying power on drying rate of white *Hypsizygus marmoreus*

2.2　白玉菇红外干燥动力学模型分析

2.2.1　干燥模型的确定

将白玉菇的红外干燥数据分别代入表 1 中的 7 个薄层干燥模型进行拟合，并利用 Origin pro 8 软件进行回归，拟合结果见表 2。从表 2 可知，所拟合的 7 种模型除 Approximation of diffusion 和 Wang and Singh 外，其余的 5 个模型 R^2 均高于 0.99，说明这 5 种薄层干燥模型对白玉菇的红外干燥过程的拟合效果都较好。Page 薄层干燥模型的 R^2 值最大，均值达 0.999 82；χ^2 和 RMSE 的均值最小，分别为 2.53×10^{-5}、1.20×10^{-4}，说明所考察的 7 个薄层干燥模型中 Page 模型拟合度最好，能较好地描述白玉菇的红外干燥过程。

2.2.2　Page 干燥模型参数的确定

根据表 2 中的拟合数据，将 Page 模型中参数 k、n 分别与所考察的干燥温度(t)和干燥功率(P)建立函数关系，并利用 Origin pro 8 软件进行一元非线性回归拟合。相关结果见式(8)至式(11)。当红外功率为 1 125 W 时，有：

$$k = -0.644\,62 + 0.031\,88t - 4.864\,5\times10^{-4}t^2 + 2.426\,67\times10^{-6}t^3 \quad (R^2=1); \tag{8}$$

$$n = -0.036\,27 - 0.010\,98t + 8.15\times10^{-4}t^2 - 6.081\,67\times10^{-6}t^3 \quad (R^2=1)。 \tag{9}$$

当红外干燥温度为 70 ℃时，有：

$$k = 0.063\,91 - 5.008\,44\times10^{-5}P + 2.222\,22\times10^{-8}P^2 \quad (R^2=0.998\,55); \tag{10}$$

$$n = 0.855\,27 + 3.846\,96\times10^{-4}P - 1.431\,6\times10^{-7}P^2 \quad (R^2=0.984\,22)。 \tag{11}$$

2.2.3　Page 干燥模型的验证

为进一步验证白玉菇红外干燥动力学模型的准确性，分别选取干燥功率为 1 125 W，干燥温度为 60、70、80、90 ℃的实验数据与模型的预测值进行比较，结果如图 5；选取干燥温度为 70 ℃，干燥功率分别为 675、900、1 125、1 350 W 时的实验数据与模型的预测值进行比较，结果如图 6。由图 5 和图 6 可知，不同干燥温度和不同干燥功率下的红外干燥动力学模型预测曲线与实验值拟合较好，说明 Page 模型可以较好地预测白玉菇的红外干燥过程，可以用来定量描述不同干燥温度和不同干燥功率下白玉菇的红外干燥过程的规律。

2.3　白玉菇红外干燥水分有效扩散系数分析

根据图 2 和图 4 的干燥速率曲线可知，白玉菇红外干燥过程由内部水分扩散控制，降速是主要干燥阶段。通过 Fick 定律将干燥实验数据代入公式(4)并进行线性回归，具体数据见表 3。从表 3 可知，固定干燥功率为 1 125 W 时，D_{eff} 随着干燥温度的升高而增大，当干燥温度从 60 ℃升高到 90 ℃时，D_{eff} 从 2.723×10^{-9} m²/s 升高到 9.088×10^{-9} m²/s；固定干燥温度为 70 ℃时，D_{eff} 随着干燥功率的升高而增大，当干燥功率从 675 W 增加到 1 350 W 时，D_{eff} 从 4.847×10^{-9} m²/s 升高到 5.243×10^{-9} m²/s。

2.4　白玉菇红外干燥活化能分析

根据 Arrhenius 方程，干燥过程的活化能可由不同温度下的 D_{eff} 与干燥温度($t+273.15$)的关系式得到。将 D_{eff} 代入式(7)，并作线性回归，结果如图 7。不同干燥温度下的直线回归方程为 $y = -4.744\,35\times10^{-3}x + -5.382\,03$，$R^2=0.978\,29$。计算得到白玉菇的红外干燥活化能 $E_a=39.45$ kJ/mol。

表 2 干燥模型数据拟合结果

Tab. 2 Fitting results of drying models

序号	t/℃	P/W	干燥常数	R^2	χ^2($\times10^{-4}$)	RMSE($\times10^{-3}$)
	60	1 125	k=0.031 16	0.998 86	1.152 73	1.04
	70	1 125	k=0.050 36	0.999 34	0.991 92	0.50
	80	1 125	k=0.063 59	0.999 13	1.551 24	0.62
1	90	1 125	k=0.083 16	0.999 81	0.422 73	0.13
	70	675	k=0.047 39	0.999 70	0.437 34	0.22
	70	900	k=0.049 60	0.999 43	0.848 80	0.42
	70	1 350	k=0.053 64	0.999 29	1.079 45	0.54
	60	1 125	k=0.041 17, n=0.925 30	0.999 60	0.401 32	0.32
	70	1 125	k=0.035 78, n=1.102 63	0.999 85	0.223 09	0.09
	80	1 125	k=0.035 02, n=1.187 53	0.999 91	0.161 93	0.05
2	90	1 125	k=0.053 45, n=1.143 51	0.999 96	0.090 05	0.02
	70	675	k=0.040 26, n=1.048 30	0.999 81	0.282 97	0.11
	70	900	k=0.036 75, n=1.089 77	0.999 84	0.241 41	0.09
	70	1 350	k=0.036 77, n=1.115 11	0.999 76	0.369 96	0.15
	60	1 125	k=0.030 99, a=0.993 91	0.998 76	1.246 79	1.56
	70	1 125	k=0.050 46, a=1.002 65	0.999 19	1.222 01	0.99
	80	1 125	k=0.063 66, a=1.001 85	0.998 85	2.056 64	0.62
3	90	1 125	k=0.083 18, a=1.000 37	0.999 71	0.633 40	0.13
	70	675	k=0.047 45, a=1.001 62	0.999 63	0.539 97	0.22
	70	900	k=0.049 69, a=1.002 44	0.999 30	1.045 66	0.42
	70	1 350	k=0.053 73, a=1.002 36	0.999 12	1.335 02	0.53
	60	1 125	k=0.032 54, a=0.983 46, c=0.014 68	0.999 69	0.308 53	0.21
	70	1 125	k=0.049 46, a=1.008 61, c=−0.006 7	0.999 10	1.350 68	0.41
	80	1 125	k=0.061 77, a=1.011 06, c=−0.009 81	0.998 69	2.339 34	0.47
4	90	1 125	k=0.081 55, a=1.005 9, c=−0.005 7	0.999 59	0.896 05	0.09
	70	675	k=0.047 25, a=1.002 83, c=−0.001 38	0.999 52	0.709 20	0.21
	70	900	k=0.048 83, a=1.007 65, c=−0.005 86	0.999 21	1.185 59	0.36
	70	1 350	k=0.053 19, a=1.005 39, c=−0.003 36	0.998 87	1.703 31	0.51
	60	1 125	k=0.031 17, a=1, b=1.000 00	0.998 53	1.482 09	1.04
	70	1 125	k=0.029 94, a=1.000 09, b=1.000 00	0.810 18	286.000 00	810.18
	80	1 125	k=0.033 45, a=1.000 09, b=1.000 00	0.697 90	538.000 00	107.60
5	90	1 125	k=0.460 45, a=−0.419 63, b=0.216 43	0.999 94	0.140 10	0.01
	70	675	k=0.047 39, a=1.000 00, b=1.000 00	0.999 51	0.728 91	0.22
	70	900	k=0.049 6, a=1.000 00, b=1.000 00	0.999 06	1.414 67	0.42
	70	1 350	k=0.053 65, a=1.000 00, b=1.000 00	0.998 81	1.799 08	0.54
	60	1 125	a=−0.016 80, b=0.000 066	0.885 58	115.400 00	92.30
	70	1 125	a=−0.028 97, b=0.000 200	0.952 39	71.700 00	28.70
	80	1 125	a=−0.036 01, b=0.000 300	0.959 78	71.600 00	21.49
6	90	1 125	a=−0.046 65, b=0.000 510	0.971 55	62.800 00	12.56
	70	675	a=−0.028 19, b=0.000 190	0.954 82	66.800 00	26.72
	70	900	a=−0.028 79, b=0.000 190	0.953 75	69.400 00	27.77
	70	1 350	a=−0.029 64, b=0.000 200	0.940 38	90.200 00	36.08
	60	1 125	a=0.993 95, c=1.678 24, L=−7.358 81	0.998 59	1.424 91	0.99
	70	1 125	a=1.002 63, c=1.583 23, L=−5.601 52	0.998 92	1.629 35	0.49
	80	1 125	a=1.001 85, c=0.010 84, L=−0.412 66	0.998 27	3.084 97	0.62
7	90	1 125	a=1.000 37, c=0.249 41, L=1.731 60	0.999 43	1.266 8	0.13
	70	675	a=1.000 162, c=0.167 44, L=1.878 51	0.999 51	0.719 96	0.22
	70	900	a=1.002 45, c=0.150 77, L=1.741 76	0.999 07	1.394 22	0.42
	70	1 350	a=1.002 38, c=0.126 89, L=1.536 62	0.998 82	1.780 03	0.53

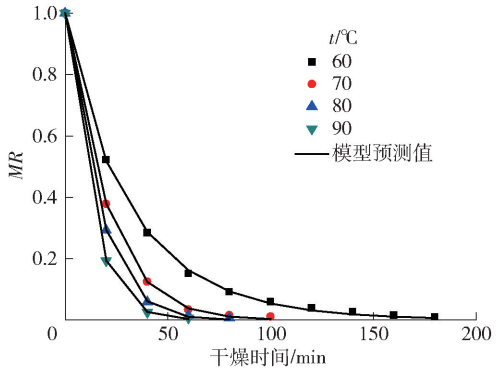

图 5　不同干燥温度下实验值与预测值的比较

Fig. 5　Comparison of experimental value and predicted value under different drying temperatures

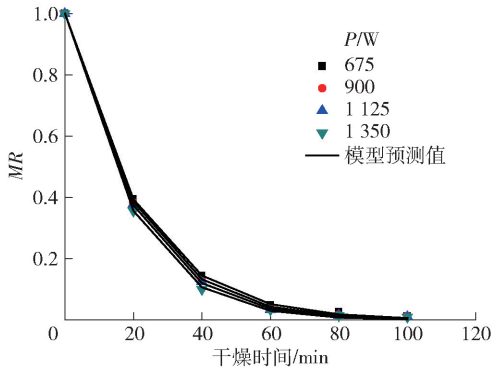

图 6　不同红外功率下实验值与预测值的比较

Fig. 6　Comparison of experimental value and predicted value under different infrared drying power

表 3　白玉菇的水分有效扩散系数

Tab. 3　Effective moisture diffusion coefficient of white *Hypsizygus marmoreus*

t/℃	P/W	线性拟合方程	R^2	D_{eff}/($m^2 \cdot s^{-1}$)
60	1 125	$\ln MR = -4.194\,3\times10^{-4}t - 0.207\,6$	0.996 81	2.723×10^{-9}
70	1 125	$\ln MR = -8.044\,23\times10^{-4}t - 0.122\,47$	0.988 57	5.222×10^{-9}
80	1 125	$\ln MR = -1.07\times10^{-3}t - 0.072\,98$	0.992 73	6.946×10^{-9}
90	1 125	$\ln MR = -1.4\times10^{-3}t - 0.037\,79$	0.996 35	9.088×10^{-9}
70	675	$\ln MR = -7.467\,15\times10^{-4}t - 0.085\,55$	0.996 54	4.847×10^{-9}
70	900	$\ln MR = -7.883\,62\times10^{-4}t - 0.118\,86$	0.989 42	5.117×10^{-9}
70	1 350	$\ln MR = -8.077\,01\times10^{-4}t - 0.118\,86$	0.988 61	5.243×10^{-9}

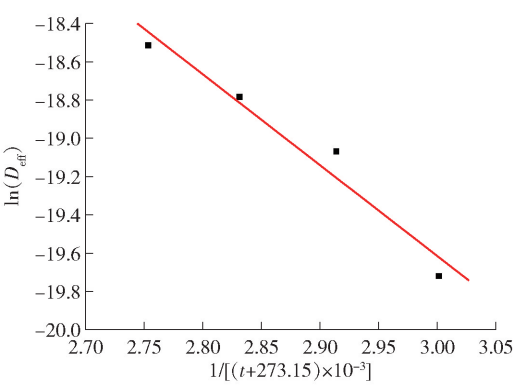

图 7　水分有效扩散系数与干燥温度的关系

Fig. 7　Relationship between effective moisture diffusion coefficient and drying temperature

3　结　论

1）分析了白玉菇在不同干燥温度(60、70、80、90 ℃)和不同干燥功率(675、900、1 125、1 350 W)下的红外干燥特性曲线。研究结果表明：干燥温度和干燥功率对白玉菇的干燥过程均有影响，但干燥温度对干燥过程影响更大，干燥温度越高，干基含水率下降越明显。

2）白玉菇的干燥过程主要为加速和降速两个阶段，没有明显的恒速阶段，其中降速阶段为主要阶段。所考察的 7 个薄层干燥模型中，Page 模型拟合度最好，Page 薄层干燥模型的 R^2 值最大，均值达 0.999 82，χ^2 和 RMSE 的均值最小，分别为 2.53×10^{-5}、1.20×10^{-4}。Page 模型可以较好地预测白玉菇的红外干燥过程，可以用来定量描述不同干燥温度和不同干燥功率下白玉菇的红外干燥过程的规律。

3）固定干燥功率为 1 125 W 时，D_{eff}随着干燥温度的升高而增大，当干燥温度从60 ℃升高到 90 ℃时，D_{eff}从 2.723×10^{-9} m^2/s 升高到 9.088×10^{-9} m^2/s；固定干燥温度为 70 ℃时，D_{eff}随着干燥功率的升高而增大，当干燥功率从 675 W 增加到 1 350 W 时，D_{eff}从 4.847×10^{-9} m^2/s 升高到5.243×10^{-9} m^2/s。白玉菇的红外干燥活化能 E_a 为 39.45 kJ/mol。在实际生产中，可以利用 Page 模型预测并

控制白玉菇中短波红外干燥过程的水分变化规律，为白玉菇中短波红外干燥工艺设计、设备选型、节能降耗、保证干制品质量提供理论依据。

参考文献：

[1] 丁涓,张莉,刘丽艳,等. 不同保鲜方法对白玉菇保鲜品质及货架期的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(22):158 – 163.
DING J, ZHANG L, LIU L Y, et al. Influence of different preservation methods on quality and shelf life of *Hypsizygus marmoreu*[J]. Food Research and Development, 2018, 39(22):158 – 163.

[2] CHEN G, WU F, PEI F, et al. Volatile components of white *Hypsizygus marmoreus* detected by electronic nose and HS-SPME-GC-MS: influence of four drying methods [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(12): 2901 – 2910.

[3] 霍宗庆, 徐婉晴, 刘言娟. 响应面法优化白玉菇多糖的提取工艺[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 152 – 156.
HUO Z Q,XU W Q,LIU Y J. Optimization of the extraction technology of polysaccharide in white *Hypsizygus marmoreus* by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22):152 – 156.

[4] WU F, TANG J, PEI F, et al. The influence of four drying methods on nonvolatile taste components of white *Hypsizygus marmoreus*[J]. European Food Research and Technology, 2015, 240(4): 823 – 830.

[5] XUE Z, HAO J, YU W, et al. Effects of processing and storage preservation technologies on nutritional quality and biological activities of edible fungi: a review[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(3): 1 – 13.

[6] 李聪, 周沫, 毕金峰, 等. 热风和中短波红外干燥对桃渣干燥特性及多酚含量的影响[J]. 现代食品科技, 2017,33(12):137 – 143.
LI C, ZHOU M, BI J F, et al. Effects of hot-air drying as well as short-and medium-wave infrared radiation drying on the drying characteristics and polyphenol content of peach pomace[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(12):137 – 143.

[7] 司旭, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 红外干燥对树莓干燥特性、品质和抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2016,16(9):157 – 164.
SI X, CHEN Q Q, BI J F, et al. Effect of infrared drying on the drying characteristics, quality and antioxidant activity of raspberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(9):157 – 164.

[8] BRUCE D M. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 ℃[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1985, 32(4): 337 – 348.

[9] PAGE G E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers[D]. West Lafagette: Purdue University, 1949.

[10] PABIS S M H S. Grain drying theory (Ⅱ): temperature effects on drying coefficients[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1961, 6(4): 169 – 174.

[11] TOGRUL İ T, PEHLIVAN D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(3): 209 – 216.

[12] CHHINNAN M S. Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(2): 610 – 615.

[13] WANG C Y, SINGH R P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1978(11): 668 – 672.

[14] DIAMANTE L M, MUNRO P A. Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1991, 26(1): 99 – 109.

[15] ONWUDE D I, HASHIM N, JANIUS R B, et al. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(3): 599 – 618.

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

[17] WANG L, XU B, WEI B, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40(1): 619 – 628.

[18] 张磊, 余筱洁, 白竣文, 等. 红外干燥方式对紫甘蓝干燥特性的影响[J]. 现代食品科技, 2017,33(12): 202 – 209.
ZHANG L, YU X J, BAI J W, et al. Effects of infrared drying technology on drying characteristics of purple cabbage[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(12):202 – 209.

Drying Characteristics and Kinetics Model of White *Hypsizygus marmoreus* with Medium and Short Wave Infrared Radiation

CHEN Jianfu[1,2,3], WANG Shaoyun[2,*], LIN Meixi[3]

(1. *School of Food Engineering*, *Zhangzhou Institute of Technology*, *Zhangzhou* 363000, *China*;
2. *College of Biological Science and Technology*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350108, *China*;
3. *Minzhong Food Corporation Limited*, *Putian* 351100, *China*)

Abstract: In order to improve the shelf life of white *Hypsizygus marmoreus*, the medium and short wave infrared radiation was used to dry white *Hypsizygus marmoreus*, and effects of drying temperature (60, 70, 80, 90 ℃) and drying power (675, 900, 1 125, 1 350 W) on drying characteristics of white *Hypsizygus marmoreus* were investigated. Drying process were fitted through 7 commonly used drying models of agricultural products and a kinetics model of middle and short wave infrared drying in white *Hypsizygus marmoreus* was established. Results showed that both drying temperature and drying power had effects on the drying process of white *Hypsizygus marmoreus*. However, drying temperature had a greater impact on the drying process. The moisture content of drying base was obviously declined with the increase of drying temperature. Drying process was controlled by internal moisture diffusion, and the slowdown phase was the main stage. The predicted value of the Page model fitted well with the experimental value, which could accurately reflect the infrared drying process of the white *Hypsizygus marmoreus*, and could be used to describe the infrared drying process of white *Hypsizygus marmoreus* quantitatively under different drying temperatures and powers. When the drying power was 1 125 W, the effective moisture diffusion coefficient of white *Hypsizygus marmoreus* was increased with the increase of drying temperature, which was from 2.723×10^{-9} m^2/s to 9.008×10^{-9} m^2/s accompanied by the drying temperature raising from 60 ℃ to 90 ℃. At drying temperature of 70 ℃, the effective moisture diffusion coefficient increased from 4.847×10^{-9} m^2/s to 5.243×10^{-9} m^2/s when the drying power increased from 675 W to 1 350 W. The midium and short wave infrared drying activation energy of white *Hypsizygus marmoreus* was 39.45 J/mol. This study aims to provide the theoretical reference to the medium and shot wave infrared radiation drying process design, equipment selection, and production control of white *Hypsizygus marmoreus*.

Keywords: white *Hypsizygus marmoreus*; medium and short wave infrared radiation; drying temperature; drying power; kinetics model

(责任编辑:叶红波)