

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.037

# 水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型研究

于海明<sup>1</sup> 李海源<sup>2</sup> 张欣悦<sup>2</sup> 王汉羊<sup>2</sup> 孙勇<sup>3</sup>

(1. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319;

3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为探究水稻秸秆营养穴盘的干燥特性及干燥过程中含水率的变化规律, 在不同的干燥温度(50、55、60、65、70℃)、热风速度(1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s)和微波功率(180、360、540、720、900 W)条件下对水稻秸秆营养穴盘进行了微波热风耦合干燥试验, 研究不同干燥因素对干燥速率和有效水分扩散系数的影响, 并建立了干燥动力学模型。研究表明: 水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥过程只有降速干燥阶段, 没有明显的恒速干燥阶段; 微波热风耦合干燥可明显增强物料内部的水分扩散能力, 提高有效水分扩散系数, 且变化规律与水分比的变化规律一致, 有效水分扩散系数变化范围为  $2.29641 \times 10^{-8} \sim 6.14736 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。通过对12个干燥动力学数学模型进行拟合, 得到Midilli et al模型具有最大 $R^2$ 平均值、最小的 $\chi^2$ 和均方根误差平均值, 且在不同条件下的水分比试验值和预测值具有很好的一致性, 说明该模型适合用于预测水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥过程中含水率的变化规律。

**关键词:** 水稻秸秆营养穴盘; 微波热风耦合干燥; 干燥动力学; 预测模型

中图分类号: TQ021.4; TS255.36 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0339-10 OSID: 

## Drying Kinetic Model of Microwave Coupled with Hot Air Drying of Straw-based Nutrient Seedling-growing Bowl Tray

YU Haiming<sup>1</sup> LI Haiyuan<sup>2</sup> ZHANG Xinyue<sup>2</sup> WANG Hanyang<sup>2</sup> SUN Yong<sup>3</sup>

(1. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to explore drying characteristics and the change law of moisture of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray during the drying process, under the conditions of different drying temperatures (50℃, 55℃, 60℃, 65℃ and 70℃), hot air speed (1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s and 3.0 m/s) and microwave power (180 W, 360 W, 540 W, 720 W and 900 W), the microwave coupled with hot air drying experiment was carried out for straw-based nutrient seedling-growing bowl tray to study the effects of different drying factors on drying rate and effective moisture diffusion coefficient, and establish a dry kinetic model. The results showed that there were only two stages: falling speed drying and rising speed drying, and there was no obvious constant-speed drying stage during the microwave combined hot air drying process of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray. The microwave coupled with hot air drying can significantly increase the moisture diffusion capacity inside the materials and improve the effective moisture diffusion coefficient, and the change law of  $D_{\text{eff}}$  with variation range of value from  $2.29641 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $6.14736 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  was consistent with the law of  $M_R$ . By fitting 12 dry kinetic mathematical models, the Midilli et al model had the largest  $R^2$  average value, the smallest  $\chi^2$  and  $e_{\text{RMSE}}$  average values, and there was a good consistency between the

收稿日期: 2019-12-16 修回日期: 2020-03-09

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B01)、国家重点研发计划项目(2016YFD0800602、2019YFD1100603)、黑龙江省自然科学基金项目(C2015037)、中国博士后科学基金项目(2016M601404)和黑龙江八一农垦大学留学归国人员科研启动基金项目(ZRCLG201902)

作者简介: 于海明(1973—),男,教授,博士,主要从事智能干燥装备及干燥技术研究, E-mail: yhm1973@163.com

通信作者: 孙勇(1974—),男,教授,博士,主要从事农牧废弃资源高值化利用技术与装备研究, E-mail: sunyong740731@163.com

value of  $M_R$  obtained from experiment and the prediction value based on Midilli et al model under different conditions, which indicated that the model was suitable for predicting the change law of moisture content during the drying process of the microwave coupled with hot air. The research results can provide theoretical basis and technical support for the application of microwave coupled hot air drying technology in drying straw-based nutrient seedling-growing bowl tray and other materials.

**Key words:** straw-based nutrient seedling-growing bowl tray; microwave coupled with hot air drying; drying kinetics; prediction model

## 0 引言

我国每年产生农作物秸秆总量约为 10.4 亿 t, 占世界首位<sup>[1]</sup>。目前, 秸秆利用主要包括能源化利用、饲料化利用、原料化利用和肥料化还田利用等 4 种方式<sup>[2]</sup>。全国每年仍有 2 亿 t 的秸秆未得到有效开发利用<sup>[3]</sup>, 过剩的秸秆主要采用田间焚烧的方式进行处理。秸秆焚烧不仅造成了资源浪费和环境污染, 同时也破坏了土壤的抗旱保湿能力。因此, 秸秆资源化利用成为目前亟待解决的问题。

水稻秸秆营养穴盘(简称营养穴盘)是水稻植质钵育秧盘的升级产品, 主要以农作物秸秆为原料, 同时添加水稻生长所必需的营养添加剂、灭菌杀毒剂, 经气压成型、干燥定型等加工工艺制备而成<sup>[4-5]</sup>。因此, 水稻种植时, 生产和利用营养穴盘, 不仅消耗了大量的农作物秸秆, 拓宽秸秆的资源化利用途径, 增加农民的收入, 而且所生产的营养穴盘还具有蓄水保墒、提高土壤肥力、延长水稻生长期、提高水稻产量等优点<sup>[6-7]</sup>。

在营养穴盘生产过程中, 营养穴盘经真空吸附成型后, 其含水率高、强度低, 无法满足播种、育秧、插秧、运输和储藏的要求, 因此, 必须对真空吸附成型后的营养穴盘进行干燥定型, 以满足生产要求<sup>[8]</sup>。目前, 水稻秸秆营养穴盘干燥定型技术主要包括自然干燥和热风干燥。自然干燥营养穴盘受自然环境影响比较大, 干燥效率低, 干燥后的营养穴盘强度低, 翘曲严重, 营养穴盘质量差, 严重影响水稻生产的后续工作; 热风干燥虽然能够满足营养穴盘干燥质量的要求, 但其干燥效率低、耗能大, 增加了生产成本, 阻碍了营养穴盘进一步的推广和应用。因此急需一种新的干燥技术对营养穴盘进行干燥。

微波热风耦合干燥过程中, 电场、磁场、温度场和热风速度场等物理场同时作用于干燥物料上, 在 4 种物理场的共同作用下, 物料中的水分被加热、迁移、蒸发, 从而达到干燥的目的。因此, 微波热风耦合干燥具有比微波干燥和热风干燥更快的干燥速率和更高的干燥品质<sup>[9-12]</sup>, 被广泛应用在农产品生产、农产品加工以及食品工业等方面<sup>[13-14]</sup>。目前, 一些学者利用微波热风耦合干燥技术对果蔬干燥特

性和动力学模型进行了研究<sup>[9,15-19]</sup>。如果将微波热风耦合干燥技术用于营养穴盘干燥, 研究干燥过程中营养穴盘含水率的变化规律, 对提高营养穴盘的干燥速率和干燥品质具有重要意义。

本文以营养穴盘为研究对象, 利用微波热风耦合干燥技术, 研究营养穴盘微波热风耦合干燥特性和干燥过程中含水率变化规律, 探讨热风速度、微波功率和热风温度对营养穴盘干燥特性的影响, 确定适合描述干燥过程中营养穴盘含水率变化规律的动力学模型, 以为微波热风耦合干燥技术在营养穴盘干燥上的应用提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

水稻秸秆营养穴盘由黑龙江省水稻生态育秧装置及全程机械化工程技术研究中心生产, 营养穴盘的尺寸(长×宽×高)为 581 mm×273 mm×16 mm, 穴孔总数为 612 个; 营养穴盘初始含水率约为 81% (湿基), 营养穴盘安全储藏含水率为 10% 左右。水稻秸秆营养穴盘如图 1 所示。

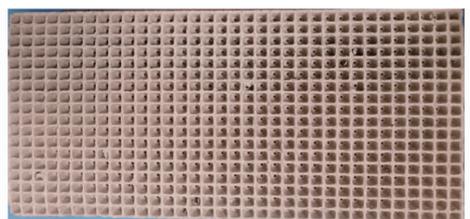


图 1 水稻秸秆营养穴盘

Fig. 1 Photograph of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray

### 1.2 仪 器 与 设 备

本文所用营养穴盘微波热风耦合干燥设备由 YHMW900-100 型微波热风耦合干燥设备改制而成, 其结构如图 2 所示。营养穴盘微波热风耦合干燥设备主要由微波干燥系统、热风干燥系统和控制系统组成, 整体尺寸(长×宽×高)为 1 570 mm×1 000 mm×505 mm, 具有微波干燥、热风干燥、微波热风并联(耦合)干燥和微波热风串联干燥功能。微波干燥系统主要由波导、磁控管、微波谐振腔组成, 微波谐振腔结构尺寸(长×宽×高)为 330 mm×

350 mm × 215 mm,微波总功率 1.3 kW,输出功率为 0.9 kW。热风干燥系统主要由气流分配室、加热器、气流初次分配稳定器和功率 550 W 离心风机组成,加热器由 3 个功率为 800 W 的远红外碳纤维电加热棒和加热管组成。微波干燥系统和热风干燥系统之间由气流分配室和气流初次分配稳定器连接在一起,实现将热风均匀送入微波谐振腔内。控制系统主要由风速传感器、温度传感器、微波调节器、时间调节器、变频器和控制显示仪等组成。

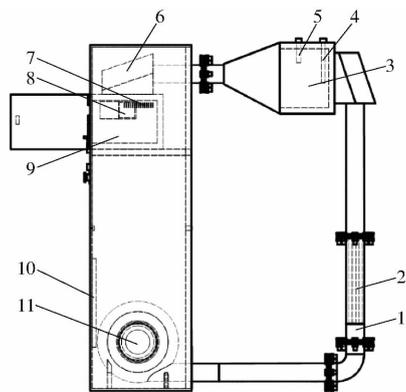


图2 微波热风耦合干燥装置结构示意图

Fig.2 Schematic of microwave coupled with hot air dryer

1. 加热管 2. 电加热棒 3. 气流初次分配稳定器 4. 温度传感器
5. 风速传感器 6. 气流分配室 7. 排湿孔 8. 微波发生器
9. 干燥室 10. 控制系统 11. 离心风机

其他仪器与设备:TL-YPCX-01型气力式水稻营养穴盘成型机(湖南双环纤维成型设备有限公司),T1000型双杰电子天平(美国双杰兄弟有限公司),JA2003N型电子精密天平(上海精科天美贸易有限公司),君斯达509A型秒表(深圳市君斯达实业有限公司),MT826型数字风速计(香港麦特尔电子科技有限公司),SF2000型三按键电子数显卡尺(桂林广陆数字测控股份有限公司),Fluke59型红外线温度计(上海世禄仪器有限公司)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 含水率的测定

水稻秸秆营养穴盘经气动成型方法压制成型后,参照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中含水率测定方法,测定营养穴盘的初始含水率约为81%(湿基),干燥后安全储藏含水率为10%(湿基)。

#### 1.3.2 试验方法

干燥前,取新压制的营养穴盘用切刀平均切成2块,每块尺寸(长×宽×高)为290 mm × 273 mm × 16 mm,将切制好的营养穴盘用塑料薄膜覆盖,以备试验用。干燥时,先将热风干燥系统运行10~20 min,当微波谐振腔内的温度达到设定温度并稳定后,将处理好的营养穴盘置于塑料托盘顶部,放入

微波谐振腔内,启动微波干燥系统进行干燥。在干燥初始阶段,每隔180 s对营养穴盘称量一次质量;在干燥的后期阶段,根据不同情况,每隔60 s对营养穴盘称量一次并观察营养穴盘表面的颜色,当营养穴盘的含水率达到10%左右(湿基)时,干燥结束。每个试验做3次,由于称量过程在几秒钟内完成,因此对干燥过程没有大的影响<sup>[20]</sup>。干燥后的营养穴盘置于自然环境中冷却,为后期营养穴盘指标的测量做准备。

#### 1.3.3 试验因素及因素变化规律

根据前期预试验及文献[9-11,21-22],确定热风速度、微波功率和热风温度为试验因素,并设计以下干燥条件:固定热风速度为2.0 m/s,微波功率为900 W,改变热风温度为50、55、60、65、70℃;固定热风速度为2 m/s,热风温度为60℃,改变微波功率为180、360、540、720、900 W;固定热风温度为60℃,微波功率为900 W,改变热风速度为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s。

#### 1.3.4 数学模型

准确描述与预测营养穴盘微波热风耦合干燥过程中的水分散失情况,对研究营养穴盘的干燥特性具有重要意义<sup>[23]</sup>。从经典的干燥动力学模型中选出12个数学模型(如表1所示, $M_R$ 表示水分比, $t$ 表示干燥时间)对营养穴盘干燥曲线进行拟合,并根据判断准则,选择出最适合描述与预测营养穴盘微波热风耦合干燥水分变化规律的数学模型。

#### 1.3.5 判断准则

利用表1中给出的12个数学模型拟合营养穴盘微波热风耦合干燥试验数据,对数学模型的拟合度进行最优评价时,有3个评价准则<sup>[20,36,38]</sup>:决定系数 $R^2$ 、离差平方和 $\chi^2$ 和均方根误差 $e_{\text{RMSE}}$ 。决定系数 $R^2$ 是评价模型拟合度最重要的指标,用来表示各变量之间的密切关系, $R^2$ 越接近1,表示回归关系越显著。 $\chi^2$ 和 $e_{\text{RMSE}}$ 反映实际值与期望值之间的变异程度,其值越小说明回归方程的预测精度越高,从而可以利用这3个准则确定最优干燥动力学模型及判断模型的优劣。

#### 1.3.6 数据处理及分析

运用Excel软件对试验数据进行处理,利用OriginPro软件对表1中的干燥曲线数学模型进行拟合分析及绘制图形。

### 1.4 干燥特性参数计算

#### 1.4.1 水分比

干燥特性中的水分比表示一定条件下物料的剩余水分率,水分比计算公式为

表1 文献中给出的干燥曲线数学模型

Tab.1 Mathematical models given in literature for drying curves

模型序号	模型名称	模型公式	文献序号
1	Newton	$M_R = \exp(-kt)$	[18]
2	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	[24]
3	Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$	[25-26]
4	Two term	$M_R = a \exp(k_0 t) + b \exp(k_1 t)$	[24]
5	Two-term exponential	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	[27]
6	Verma et al	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	[28]
7	Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$	[29-30]
8	Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$	[31]
9	Approximation of diffusion	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[32]
10	Midilli et al	$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$	[33-34]
11	Modified page	$M_R = \exp(-(kt)^n)$	[35-36]
12	Weibull distribution	$M_R = a - b \exp(-kt^n)$	[37]

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中  $M_e$ ——试样平衡含水率(干基), kg/kg

$M_0$ ——初始含水率(干基), kg/kg

$M_t$ —— $t$ 时刻含水率(干基), kg/kg

由于  $M_t$  和  $M_0$  远大于  $M_e$ , 则式(1)可以进一步简化为

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

#### 1.4.2 干燥速率

干燥特性中的干燥速率是研究干燥动力学的一个重要参数, 能够反映干燥时间、干燥含水率和干燥速率之间的关系。干燥速率计算公式

$$D_R = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3)$$

式中  $D_R$ ——干燥速率, kg/(kg·min)

#### 1.4.3 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数<sup>[39-40]</sup>为当水分浓度梯度为1的条件下, 每秒钟通过单位面积的水分扩散量, 它反映了干燥物料干燥过程模型的重要特性, 是计算、模拟干燥物料水分迁移机理必不可少的参数之一。当长方形、圆形和球形等形状的物料干燥主要由降速干燥阶段控制时, 可以用 Fick 第二定律来描述物料内部的水分扩散过程。有效水分扩散系数可以通过简化 Fick 第二定律计算得到。假设水分是通过扩散迁移、干燥物料的体积收缩可以忽略不计、具有恒定的扩散系数和温度, 则菲克定律一般级数解球面坐标形式为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} \exp\left(-\frac{(2N+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

式中  $D_{\text{eff}}$ ——有效水分扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

$L$ ——样品的半厚度, m

$N$ ——正整数

如果干燥时间长, 则式(4)可以进一步简化为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

式(5)可以表示成对数形式, 即

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \quad (6)$$

式(6)可以进一步表示成斜率的形式, 即

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

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干燥条件下的水分比

在不同的热风温度、微波功率和热风速度条件下, 营养穴盘水分比随时间的变化曲线如图3所示。由图3可以看出, 营养穴盘的水分比随着干燥时间的延长而逐渐降低。在微波功率为900 W和热风速度为2.0 m/s的干燥条件下, 设定热风温度为50、55、60、65、70℃, 不同热风温度下的物料水分比变化曲线如图3a所示。从图3a中可以看出, 热风温度越高, 营养穴盘达到最终含水率10%(湿基)的干燥时间越短; 当热风温度为60、65、70℃时, 营养穴盘达到最终含水率的干燥时间分别为34.83、34.82、34.70 min, 温度对干燥时间的影响不大, 但明显小于热风温度为50℃和55℃时的干燥时间38.3 min和36.7 min。在微波的作用下, 营养穴盘内部直接产生热量, 使营养穴盘内部的水分气化并形成蒸汽流, 造成营养穴盘内部压力升高, 促使营养穴盘内部的水分和蒸汽向营养穴盘的表面迁移和扩散; 与此同时, 在热风温度的作用下, 营养穴盘的表面温度升高, 将营养穴盘表面的水分和在微波的作用下扩散

到表面的水分蒸发到空气中去,温度越高,蒸发越快,由于试验各组的营养穴盘质量和最初含水率基本一致,因此,随着热风温度的升高,营养穴盘达到最终含水率 10% (湿基) 的干燥时间变短。在热风温度为 60℃ 和热风速度为 2.0 m/s 的干燥条件下,设定微波功率为 180、360、540、720、900 W,不同微波功率下的物料水分比变化曲线如图 3b 所示。由图 3b 可知,微波功率从 180 W 增加到 900 W 时,营养穴盘达到最终含水率 10% 的干燥时间从 86.04 min 减小到 35.01 min,干燥时间降低了 59.2%,干燥水分比曲线的变化趋势也较大。微波在干燥营养穴盘时,营养穴盘内水等极性分子受高频变化的电磁场影响下,以每秒钟上亿次转动,分子间的碰撞和摩擦产生大量的热,从而将电磁能转化为蒸发水分的热能。当提高微波功率后,电磁场的强度变强,在相同的时间内,相同质量的营养穴盘能够获得更多的电磁能<sup>[41]</sup>,使水分子吸收微波能量增加,分子间的碰撞和摩擦产生的热量增加,从而转化更多用来干燥营养穴盘的热能,加速营养穴盘中水

分蒸发,使干燥的时间减小,干燥水分比曲线的变化趋势较大。在微波功率为 900 W 和热风温度为 60℃ 的干燥条件下,设定热风速度为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s,不同热风速度下的物料水分比变化曲线如图 3c 所示。由图 3c 可知,营养穴盘的脱水率随着热风速度的增加而增加,营养穴盘达到最终含水率干燥时间随着热风速度的增加而减小,当热风速度为 3.0 m/s 时,干燥时间最大值为 31.4 min,当热风速度为 1.0 m/s 时,干燥时间最小值为 37.8 min。热风速度越高,营养穴盘表面的气流流动越强烈,营养穴盘表面的质热传递边界层越薄,表面扩散阻力越小<sup>[42]</sup>,越有利于营养穴盘表面水分的蒸发。然而,风速的变化只能影响营养穴盘表面的质热传递状态,对营养穴盘内部的水分影响较小,所以当热风速度从 1.0 m/s 增加到 3.0 m/s 时,干燥时间仅降低了 16.93%。以上试验结果与利用微波热风耦合干燥技术干燥某些果蔬有一定的差异<sup>[10]</sup>,可能是干燥物料的种类、干燥条件、干燥环境的变化和其它一些原因造成的。

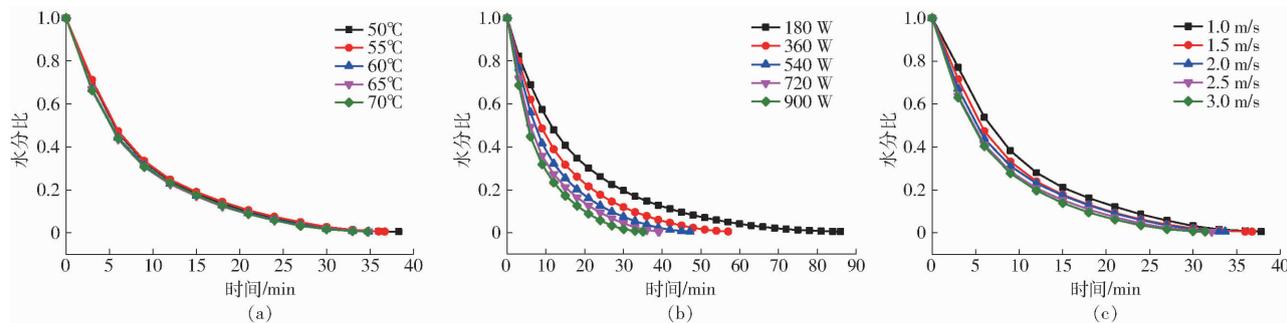


图 3 不同干燥条件下营养穴盘水分比变化曲线

Fig. 3 Moisture ratio curves of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray under different drying conditions

## 2.2 不同干燥条件下干燥速率的变化分析

在不同的热风温度、微波功率和热风速度干燥条件下,营养穴盘的干燥速率随干基含水率的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,在不同的干燥条件下,营养穴盘微波热风耦合干燥过程干燥速率变化趋势基本一致。在干燥起始阶段,干燥速率变化最快,出现峰值,随后,干燥速率随含水率的减小而缓

慢减小,并且干燥过程主要发生在这一阶段,因此,除去起始阶段,整个干燥过程可以看成降速干燥,没有恒速干燥过程。在不同果蔬微波热风耦合干燥过程中也发现了类似的结果,如马铃薯切片<sup>[43]</sup>干燥、油茶籽<sup>[26]</sup>干燥等。产生这种变化的原因主要是:营养穴盘在整个干燥过程中,受固体物料中水分扩散的影响。在干燥开始阶段,由于营养穴盘的含水率

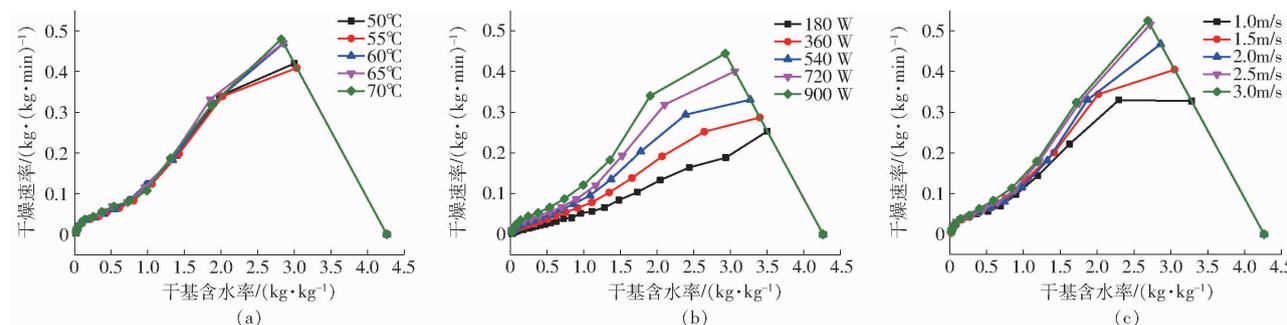


图 4 不同干燥条件下营养穴盘干燥速率变化曲线

Fig. 4 Drying rate curves of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray under different drying conditions

较高,干燥速率的最初增加被认为是由于干燥样品的预热造成的<sup>[44]</sup>,此时在微波热风耦合作用下,营养穴盘能够吸收更多的能量,导致水分迁移、扩散及蒸发增强,干燥速率快速变化并达到最大值;随着干燥的进行,含水率降低,所吸收的微波及热风的能量也减少,干燥速率也开始下降<sup>[23,45]</sup>。从图4b可以看出,曲线上的峰值是随着微波功率的增加而增大。这可能与微波的作用下在营养穴盘内部快速形成的多孔结构有关,通过源体积加热,促进了水蒸气的扩散,在微波功率的驱动下,水蒸气被迫穿过营养穴盘,扩大了内部的空隙结构。从图4c可以看出,曲线上的峰值在热风速度为3.0 m/s时达到最大。这主要是因为热风速度为3.0 m/s时,热风能够更快地促使营养穴盘表面的水分蒸发,在微波热风耦合作用下,使干燥速率达到最大。

### 2.3 不同干燥条件下有效水分扩散系数的变化分析

在干燥的降速阶段,干燥样品的内部阻抗控制着传质;在干燥期间,水分的迁移由内部的扩散控制。在这种情况下,Fick第二定律能用来预测有效的扩散。根据试验数据计算得到 $M_R$ 、 $\ln M_R$ 和干燥时间 $t$ ,由式(4)~(7)计算得到有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}}$ ,如表2所示。在微波功率900 W和热风速度2.0 m/s不变的情况下,随着温度(50~70℃)的增加,有效水分扩散系数逐渐增加; $D_{\text{eff}}$ 介于 $5.18764 \times 10^{-8} \sim 5.47297 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间;在微波功率900 W和热风温度60℃不变的情况下,随着在热风速度(1.0~3.0 m/s)的增加,有效水分扩散系数随着热风速度的增加逐渐增加, $D_{\text{eff}}$ 介于 $4.85045 \times 10^{-8} \sim 6.14736 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间;在热风温度60℃和热风速度2.0 m/s不变的情况下,随着微波功率(180~900 W)的增加,有效水分扩散系数随着微波功率的

增加而增大, $D_{\text{eff}}$ 介于 $2.29641 \times 10^{-8} \sim 5.44703 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。这一规律与水分比随时间变化的规律一致。利用微波热风耦合干燥技术对山楂和山药干燥得到的有效水分扩散系数与对营养穴盘干燥得到的有效水分扩散系数存在一定的差异<sup>[9-10]</sup>,这些差异主要是由于干燥物料的种类、干燥方法、干燥条件、物理或化学参数、几何尺寸(如厚度和直径)、含水率、干燥环境以及用于计算的数学模型等不同引起的<sup>[23]</sup>。另外,在不同干燥条件下,有效水分扩散系数变化范围为 $2.29641 \times 10^{-8} \sim 6.14736 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ,比利用热风和接触式超声强化热泵干燥技术对一些物料干燥得到的有效水分扩散系数大1~2个数量级<sup>[26,42,46-47]</sup>,与热风和接触式超声强化热泵干燥相比,微波热风耦合干燥能够明显增加物料内部的水分扩散能力,提高有效水分扩散系数。一方面微波能够直接对干燥物料的内部加热,使干燥物料的内部温度升高,形成内高外低的温度梯度,使物料内部的水分迅速蒸发产生蒸汽,形成压力梯度,产生类似泵效应,驱动液体由干燥物料内部快速流向表面;而热风干燥是热能通过热空气传递给干燥物料的表面,物料表面温度升高,使物料表面的温度高于干燥物料内部的温度,形成温度梯度,热能在温度梯度的作用下,从干燥物料的表面向内部传递。随着温度的升高,通过微波干燥驱动到物料表面的部分水分开始蒸发,使物料表面的水分浓度低于物料内部的水分浓度,形成浓度差,即浓度梯度,在浓度梯度的作用下,物料内部的水分又逐渐迁移到物料的表面并被散发到空气中去<sup>[48-49]</sup>;另一方面,在微波的作用下,使干燥物料内部产生更多的开放结构和气孔<sup>[11]</sup>,使水分在这些开放结构和气孔中更容易扩散到物料的表面,增加了扩

表2 不同干燥条件下营养穴盘干燥有效水分扩散系数

Tab.2 Moisture effective diffusion coefficients of straw-based nutrient seedling-growing bowl tray under different drying conditions

微波功率/W	热风速度/(m·s <sup>-1</sup> )	热风温度/℃	斜率 $\gamma$	有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2$
900	2.0	50	0.002 00	$5.18764 \times 10^{-8}$	0.963 41
900	2.0	55	0.002 01	$5.21358 \times 10^{-8}$	0.945 02
900	2.0	60	0.002 07	$5.36921 \times 10^{-8}$	0.951 30
900	2.0	65	0.002 11	$5.47297 \times 10^{-8}$	0.956 64
900	2.0	70	0.002 11	$5.47297 \times 10^{-8}$	0.952 75
180	2.0	60	0.000 89	$2.29641 \times 10^{-8}$	0.977 53
360	2.0	60	0.001 23	$3.19040 \times 10^{-8}$	0.955 91
540	2.0	60	0.001 53	$3.96855 \times 10^{-8}$	0.955 94
720	2.0	60	0.001 83	$4.74669 \times 10^{-8}$	0.940 00
900	2.0	60	0.002 10	$5.44703 \times 10^{-8}$	0.955 03
900	1.0	60	0.001 87	$4.85045 \times 10^{-8}$	0.939 31
900	1.5	60	0.002 06	$5.34327 \times 10^{-8}$	0.960 29
900	2.0	60	0.002 12	$5.49890 \times 10^{-8}$	0.940 67
900	2.5	60	0.002 24	$5.81016 \times 10^{-8}$	0.951 49
900	3.0	60	0.002 37	$6.14736 \times 10^{-8}$	0.958 43

散通道,减少了扩散阻力。

## 2.4 干燥动力学模型的确定

### 2.4.1 模型选择

在不同的热风温度、微波功率和热风速度干燥条件下,由试验测得营养穴盘连续含水率数据,由式(2)转换成水分比,然后以干燥时间  $t$  为自变量,利用表1中给出的12个常用的数学模型进行拟合,得到12个数学模型在不同的干燥条件下决定系数  $R^2$ 、离差平方和  $\chi^2$  和均方根误差  $e_{RMSE}$  范围及平均值,具体如表3所示。从表3可知, Midilli et al 模型  $R^2$  的平均值为 0.999 15,为最大,  $\chi^2$  和  $e_{RMSE}$  的平均值为  $9.829 2 \times 10^{-5}$  和 0.009 69,为最小。因此,在试验研究的范围内, Midilli et al 模型被认为在所选的12个数学模型中是最好的模型,能够代表营养穴盘

微波热风耦合干燥的行为,能够对营养穴盘的干燥水分比进行预测。文献[17]利用微波热风辅助干燥方法对菊花进行了干燥,确定 Midilli et al 模型适合预测菊花干燥过程中水分变化规律,文献[23]利用微波对疏解棉秆进行干燥,也得到 Midilli et al 模型适合描述疏解棉秆微波干燥过程中水分变化规律;但利用微波热风耦合干燥技术对山药<sup>[9]</sup>和山楂<sup>[10]</sup>等干燥,却得到 Two-term exponential 模型和 Weibull distribution 模型适合描述山药和山楂干燥过程中的水分变化规律,产生这种差异的原因可能与干燥物料的种类、干燥物料的形状、物理或化学参数等有关。不同干燥条件下 Midilli et al 模型中干燥系数和常数值如表4所示。

为了进一步描述干燥因素对 Midilli et al 模型的

表3 营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型  $R^2$ 、 $\chi^2$  和  $e_{RMSE}$  值范围与平均值

Tab.3 Range and average value of  $R^2$ ,  $\chi^2$  and  $e_{RMSE}$  of drying kinetic models for straw-based nutrient seedling-growing bowl tray

模型 序号	$R^2$		$\chi^2$		$e_{RMSE}$	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
1	0.996 78 ~ 0.998 89	0.997 75	$1.010 97 \times 10^{-4}$ ~ $2.966 71 \times 10^{-4}$	$1.979 81 \times 10^{-4}$	0.010 05 ~ 0.017 22	0.013 91
2	0.998 36 ~ 0.999 47	0.998 77	$3.797 80 \times 10^{-5}$ ~ $1.576 90 \times 10^{-4}$	$1.190 35 \times 10^{-4}$	0.006 16 ~ 0.012 56	0.010 78
3	0.997 15 ~ 0.998 89	0.997 98	$1.092 99 \times 10^{-4}$ ~ $2.892 71 \times 10^{-4}$	$1.939 59 \times 10^{-4}$	0.010 45 ~ 0.017 01	0.013 77
4	0.998 16 ~ 0.999 62	0.998 88	$2.914 00 \times 10^{-5}$ ~ $2.279 79 \times 10^{-4}$	$1.313 71 \times 10^{-4}$	0.005 40 ~ 0.015 10	0.011 26
5	0.998 04 ~ 0.999 10	0.998 58	$6.790 80 \times 10^{-5}$ ~ $1.812 34 \times 10^{-4}$	$1.361 24 \times 10^{-4}$	0.008 24 ~ 0.013 46	0.011 57
6	0.997 65 ~ 0.999 62	0.998 65	$2.820 30 \times 10^{-5}$ ~ $2.540 10 \times 10^{-4}$	$1.430 97 \times 10^{-4}$	0.005 31 ~ 0.015 94	0.011 67
7	0.997 31 ~ 0.998 92	0.998 08	$1.162 91 \times 10^{-4}$ ~ $2.938 01 \times 10^{-4}$	$2.012 48 \times 10^{-4}$	0.010 78 ~ 0.017 14	0.014 02
8	0.896 04 ~ 0.966 89	0.935 92	$3.420 00 \times 10^{-3}$ ~ $7.390 00 \times 10^{-3}$	$6.030 67 \times 10^{-3}$	0.058 52 ~ 0.085 96	0.077 41
9	0.996 78 ~ 0.999 62	0.998 56	$2.820 30 \times 10^{-5}$ ~ $3.625 97 \times 10^{-4}$	$1.539 06 \times 10^{-4}$	0.005 31 ~ 0.019 04	0.011 95
10	0.998 66 ~ 0.999 74	0.999 15	$2.003 50 \times 10^{-5}$ ~ $1.663 33 \times 10^{-4}$	$9.829 20 \times 10^{-5}$	0.004 48 ~ 0.012 90	0.009 69
11	0.998 36 ~ 0.999 47	0.998 77	$3.797 80 \times 10^{-5}$ ~ $1.576 90 \times 10^{-4}$	$1.190 34 \times 10^{-4}$	0.006 16 ~ 0.012 56	0.010 78
12	0.998 59 ~ 0.999 71	0.999 10	$2.231 70 \times 10^{-5}$ ~ $1.722 53 \times 10^{-4}$	$1.046 64 \times 10^{-4}$	0.004 72 ~ 0.013 12	0.010 01

表4 Midilli et al 模型在不同干燥条件下的统计结果及其常数和系数

Tab.4 Statistical results of Midilli et al model and its constants and coefficients under different drying conditions

功率/W	热风速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	热风温度/ °C	$a$	$k$	$n$	$b$	$R^2$	$\chi^2$	$e_{RMSE}$
900	2.0	50	1.004 08	0.136 93	0.935 35	-0.000 29	0.998 97	$1.20 \times 10^{-4}$	0.010 95
900	2.0	55	1.004 88	0.135 92	0.926 21	-0.000 37	0.998 66	$1.56 \times 10^{-4}$	0.012 51
900	2.0	60	1.002 59	0.161 16	0.880 18	-0.000 56	0.999 32	$8.14 \times 10^{-4}$	0.009 02
900	2.0	65	1.002 80	0.161 50	0.887 01	-0.000 51	0.999 15	$1.02 \times 10^{-4}$	0.010 10
900	2.0	70	1.002 29	0.167 20	0.865 71	-0.000 68	0.999 27	$8.73 \times 10^{-5}$	0.009 34
180	2.0	60	1.005 28	0.079 85	0.885 81	-0.000 15	0.999 74	$2.00 \times 10^{-5}$	0.004 48
360	2.0	60	1.006 59	0.092 94	0.920 29	-0.000 25	0.999 39	$5.76 \times 10^{-5}$	0.007 59
540	2.0	60	1.006 25	0.107 38	0.934 81	-0.000 26	0.999 06	$9.70 \times 10^{-5}$	0.009 85
720	2.0	60	1.004 70	0.137 19	0.892 18	-0.000 49	0.998 87	$1.24 \times 10^{-4}$	0.011 12
900	2.0	60	1.003 22	0.147 70	0.914 93	-0.000 49	0.999 08	$1.13 \times 10^{-4}$	0.010 64
900	1.0	60	1.006 81	0.097 63	1.020 15	-0.000 28	0.998 66	$1.66 \times 10^{-4}$	0.012 90
900	1.5	60	1.004 29	0.126 42	0.969 47	-0.000 26	0.999 06	$1.12 \times 10^{-4}$	0.010 58
900	2.0	60	1.003 03	0.163 26	0.874 32	-0.000 66	0.999 03	$1.16 \times 10^{-4}$	0.010 79
900	2.5	60	1.001 86	0.182 49	0.859 10	-0.000 69	0.999 41	$7.49 \times 10^{-5}$	0.008 65
900	3.0	60	1.001 34	0.180 67	0.878 96	-0.000 64	0.999 64	$4.61 \times 10^{-5}$	0.006 79

影响,利用回归分析法建立了干燥模型系数和常数( $a$ 、 $k$ 、 $n$ 、 $b$ )与干燥因素(热风温度、微波功率、热风速度)之间的方程。Midilli et al 模型系数和常数与干燥因素之间的回归方程如下:

当微波功率为 900 W、热风速度为 2.0 m/s 时

$$a = -6.70282 + 0.51651T - 0.01291T^2 + 1.42540 \times 10^{-4}T^3 - 5.87333 \times 10^{-7}T^4 \quad (R^2 = 1)$$

$$k = 0.00188T + 3.66382 \times 10^{-5}T^2 - 4.18251 \times 10^{-7}T^3 \quad (R^2 = 0.99884)$$

$$n = 0.07062T - 0.00176T^2 + 1.74109 \times 10^{-5}T^3 - 5.95269 \times 10^{-8}T^4 \quad (R^2 = 0.99990)$$

$$b = 2.04362 \times 10^{-5}T - 7.79249 \times 10^{-7}T^2 + 5.04058 \times 10^{-9}T^3 \quad (R^2 = 0.99224)$$

当热风温度为 60℃、热风速度为 2.0 m/s 时

$$a = 1.00121 + 3.16204 \times 10^{-5}P - 5.47840 \times 10^{-8}P^2 + 2.45770 \times 10^{-11}P^3 \quad (R^2 = 0.99860)$$

$$k = 0.09304 - 1.49958 \times 10^{-4}P - 5.47840 \times 10^{-8}P^2 - 2.95067 \times 10^{-10}P^3 \quad (R^2 = 0.98981)$$

$$n = 1.02828 - 0.00187P + 8.02886 \times 10^{-6}P^2 - 1.24740 \times 10^{-8}P^3 - 6.33954 \times 10^{-12}P^4 \quad (R^2 = 1)$$

$$b = -2.27786 \times 10^{-4} + 8.89547 \times 10^{-7}P - 2.97010 \times 10^{-9}P^2 + 1.82996 \times 10^{-12}P^3 \quad (R^2 = 0.91097)$$

当微波功率为 900 W、热风温度为 60℃时

$$a = 1.01547 - 0.01188V + 0.00361V^2 - 4.06667 \times 10^{-4}V^3 \quad (R^2 = 0.99777)$$

$$k = 0.10462 - 0.08179V + 0.09388V^2 - 0.01940V^3 \quad (R^2 = 0.99871)$$

$$n = 0.96440 + 0.26019V - 0.25505V^2 + 0.05303V^3 \quad (R^2 = 0.97949)$$

$$b = -0.01028 + 0.02322V - 0.01869V^2 + 0.00621V^3 - 7.35479 \times 10^{-4}V^4 \quad (R^2 = 1)$$

式中  $T$ ——热风温度,℃  $P$ ——微波功率,W  
 $V$ ——热风速度,m/s

#### 2.4.2 模型验证

为了验证 Midilli et al 模型是否能够对营养穴盘微波热风耦合干燥特征进行准确预测,根据试验值得到的  $M_R$  与通过 Midilli et al 模型预测得到的  $M_R$  对比如图 5 所示。根据文献[10,39],如果预测值和实际值的曲线大约呈 45°角,说明预测值能够很好地代表实际值。从图 5 可以看出,不同热风温度、热风速度和微波功率下的水分比  $M_R$  的试验值和预测值具有很好的一致性。这些数据点是呈大约 45°角的带状直线图,能够证明在这 3 个条件下 Midilli et al 模型能够对营养穴盘微波热风耦合干燥特征进行很好的预测。

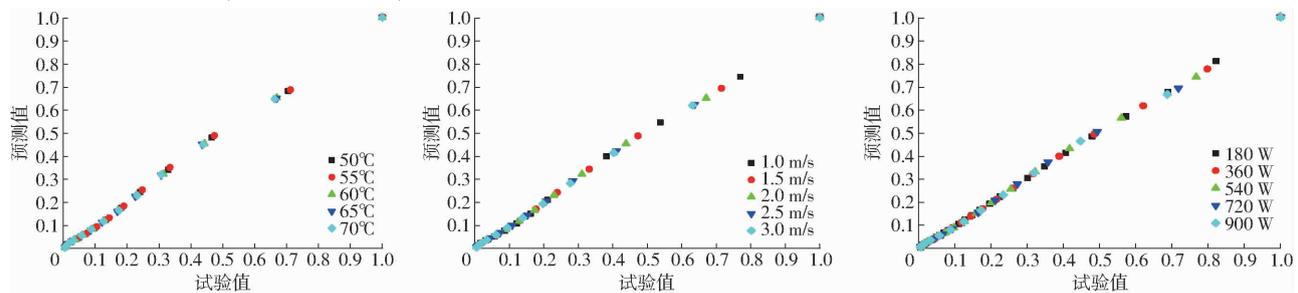


图 5 不同干燥条件下 Midilli et al 模型  $M_R$  试验值和预测值对比

Fig. 5 Comparison of experimental and predicted  $M_R$  from Midilli et al model under different drying conditions

### 3 结论

(1) 营养穴盘微波热风耦合干燥主要干燥过程为降速干燥阶段,没有明显的恒速干燥阶段。

(2) 与热风和接触式超声强化热泵等干燥相比,微波热风耦合干燥能明显增强物料内部的水分扩散能力,提高有效水分扩散系数,  $D_{eff}$  的变化范围为  $2.29641 \times 10^{-8} \sim 6.14736 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , 且其变

化规律与  $M_R$  的变化规律一致。

(3) 通过对 12 个干燥动力学数学模型进行拟合分析可知, Midilli et al 模型具有最大的  $R^2$  平均值、最小的  $\chi^2$  和  $e_{RMSE}$  平均值, Midilli et al 模型为营养穴盘微波热风耦合干燥最优拟合模型,且该模型的试验值与预测值较为一致,说明 Midilli et al 模型能够较好地描述营养穴盘微波热风耦合干燥过程中的含水率变化规律。

#### 参 考 文 献

[1] 钱玉婷,张应鹏,杜静,等. 江苏省秸秆综合利用途径利弊分析及收储运对策研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 154-160.

QIAN Yuting, ZHANG Yingpeng, DU Jing, et al. Advantages and disadvantages analysis of comprehensive utilization of straw in Jiangsu Province and countermeasure suggestions for collection-storage-transportation system[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 154-160. (in Chinese)

- [2] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 1-21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170501&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)
- [3] 胡鑫,冯晶,赵立欣,等. 干法厌氧发酵反应器及过程控制技术研究进展[J]. 中国沼气, 2018, 36(2): 68-75. HU Xin, FENG Jing, ZHAO Lixin, et al. Research progress of dry anaerobic fermentation reactors and its process control technique[J]. China Biogas, 2018, 36(2): 68-75. (in Chinese).
- [4] 刘洪杰,刘俊峰,郝建军,等. 生物质育苗钵及成型装备[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 52-54,74. LIU Hongjie, LIU Junfeng, HAO Jianjun, et al. Biomass seeding bowl and molding equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 52-54,74. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120211&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120211&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.011. (in Chinese)
- [5] 张欣悦,汪春,李连豪,等. 水稻植质钵育苗秧盘制备工艺及参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 153-162. ZHANG Xinyue, WANG Chun, LI Lianhao, et al. Preparation technology and parameters optimization for seedling-growing bowl tray made of paddy straw[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 153-162. (in Chinese)
- [6] 韩永俊,陈海涛,刘丽雪,等. 水稻秸秆纤维制取工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 281-286. HAN Yongjun, CHEN Haitao, LI Lixue, et al. Optimization of technical parameters for preparing fiber from rice straw[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 281-286. (in Chinese)
- [7] 李连豪,张伟,汪春,等. 水稻植质钵盘高强度结构设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 88-97. LI Lianhao, ZHANG Wei, WANG Chun, et al. High strength structural design and influence test for rice seedling-growing bowl tray made of paddy-straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 88-97. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141114&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141114&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.014. (in Chinese)
- [8] 于海明,汪春,谢秋菊,等. 水稻植质钵育苗秧盘蒸汽干燥装置研制及性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 25-33. YU Haiming, WANG Chun, XIE Qiuju, et al. Development and performance experiment of steam drying device of seedling-growing tray made of paddy-straw[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 25-33. (in Chinese)
- [9] 王汉羊,刘丹,于海明. 山药微波热风耦合干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 115-121. WANG Hanyang, LIU Dan, YU Haiming. Drying characteristics and kinetic model of Chinese yam using microwave coupled with hot air[J]. Food Science, 2018, 39(15): 115-121. (in Chinese)
- [10] YU Haiming, ZUO Chuncheng, XIE Qiuju. Drying characteristics and model of Chinese hawthorn using microwave coupled with hot air[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2015. <http://doi.org/10.1155/2015/480752>.
- [11] YU Haiming, ZUO Chuncheng, XIE Qiuju. Parameter optimization for microwave coupled with hot air drying process of hawthorn slices using response-surface methodology[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(2): 121-134.
- [12] WANG Qingfa, LI Song, HAN Xue, et al. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods[J]. LWT, 2019, 107: 236-242.
- [13] HORUZ E, HÜSEYİN B, HALUK K, et al. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect[J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 54(2): 425-436.
- [14] 马旭,马成林,张守勤,等. 机械式空气整根钵苗移栽器的研究[J]. 农业工程学报, 1997,13(增刊): 272-275. MA Xu, MA Chenglin, ZHANG Shouqin, et al. The study on transplanting unit of the mechanical type air-pruning tray seedling growing[J]. Transactions of the CSAE, 1997,13(Supp.): 272-275. (in Chinese)
- [15] HEMIS M, RUPAL C, WASTSON D G. A coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(3): 202-209.
- [16] TALENS C, MARTA C-G, FITO P J. A thermodynamic model for hot air microwave drying of orange peel[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 175:33-42.
- [17] WANG Ying, LI Xia, CHEN Xuetao, et al. Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum[J]. Chemical Engineering and Processing—Process Intensification, 2018, 129: 84-94.
- [18] HORUZ E, BOZKURT H, KARATAS H, et al. Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries[J]. Food Chem., 2017, 230: 295-305.
- [19] 卫灵君,宋飞虎,周洪梅,等. 热风微波耦合干燥牛蒡动力学模型研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8): 1416-1420. WEI Lingjun, SONG Feihu, ZHOU Hongmei, et al. Study on dynamic model of coupled hot air and microwave drying of burdock[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(8): 1416-1420. (in Chinese)
- [20] YI Xiaokang, WU Wenfu, ZHANG Yaqui, et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of Chinese jujubes[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2012. DOI:10.1155/2012/386214.
- [21] ERTEKIN C, YALDIZ O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(3): 349-359.
- [22] ORIKASA T, WU L, SHIINA T, et al. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2): 303-308.
- [23] 王红提,郭康权,李鹏,等. 疏解棉秆的微波干燥动力学及能耗分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 294-301. WANG Hongti, GUO Kangquan, LI Peng, et al. Microwave drying kinetics and energy consumption analysis of extruded cotton stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 294-301. (in Chinese)
- [24] SIMHA P, MATHEW M, GANESAPILLAI M. Empirical modeling of drying kinetics and microwave assisted extraction of bioactive compounds from *Adathoda vasica* and *Cymbopogon citratus*[J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55(1): 141-150.

- [25] LI Yuanhui, QI Yaru, WU Zhenfeng, et al. Comparative study of microwave-vacuum and vacuum drying on the drying characteristics, dissolution, physicochemical properties, and antioxidant capacity of *Scutellaria* extract powder[J]. *Powder Technology*, 2017, 317: 430 – 437.
- [26] 王凤贺, 丁治春, 陈鹏泉, 等. 油茶籽热风干燥动力学研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊): 426 – 432. WANG Fenghe, DING Yechun, CHEN Pengxiao, et al. Investigation on hot-air drying of *Camellia oleifera* seeds[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.): 426 – 432. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s058&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s058&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.058. (in Chinese)
- [27] LI Chao, LIAO Junjie, YIN Yang, et al. Kinetic analysis on the microwave drying of different forms of water in lignite[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 176: 174 – 181.
- [28] MIRZABEIGI K O, SADEGHI M, MIREEI S A. Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2016, 9(3): 216 – 223.
- [29] OZDEMIR M, ONURDEVRES Y. Thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999, 42(4): 225 – 233.
- [30] 于镇伟, 陈坤杰, 高崎, 等. 有机污泥干燥特性与干燥模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 286 – 291. YU Zhenwei, CHEN Kunjie, GAO Qi, et al. Drying characteristics and mathematical modeling of organic sludges[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 286 – 291. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171036&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171036&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.036. (in Chinese)
- [31] JAFARI H, KALANTARI D, AZADBAKHT M. Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and its qualitative study[J]. *Energy*, 2017, 138: 1016 – 1029.
- [32] YALDYZ O, ERTEKYN C. Thin layer solar drying of some vegetables[J]. *Drying Technology*, 2007, 19(3–4): 583 – 597.
- [33] DOYMAZ İ. Mathematical modeling of drying of tomato slices using infrared radiation[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(1): 389 – 396.
- [34] MENGES H O, ERTEKIN C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(1): 119 – 125.
- [35] MIHINDUKULASURIYA S D F, JAYASURIYA H P W. Mathematical modeling of drying characteristics of chilli in hot air oven and fluidized bed dryers[J]. *Agricultural Engineering International; CIGR Journal*, 2013, 15(1): 154 – 166.
- [36] 丁昌江, 杨茂生. 直流高压电场中枸杞的干燥特性与数学模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 302 – 311. DING Changjiang, YANG Maosheng. Drying characteristics and mathematical models of Chinese wolfberry in DC high voltage electric field[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 302 – 311. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170640&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170640&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.040. (in Chinese)
- [37] WEIBULL W. A statistical distribution of wide applicability[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18: 293 – 297.
- [38] MOTAVALI A, NAJAFI G H, ABBASI S, et al. Microwave-vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks[J]. *J. Food Sci. Technol.*, 2013, 50(4): 714 – 722.
- [39] SOYSAL Y, ÖZTEKIN S, EREN Ö. Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(4): 403 – 413.
- [40] LI Z Y, WANG R F, KUDRA T. Uniformity issue in microwave drying[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(6): 652 – 660.
- [41] 冯磊, 张世红, 杨晴, 等. 焦煤微波干燥特性及动力学研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2458 – 2464. FENG Lei, ZHANG Shihong, YANG Qing, et al. Study on microwave drying characteristics and kinetics of coking coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(10): 2458 – 2464. (in Chinese)
- [42] 刘云宏, 苗帅, 孙悦, 等. 接触式超声强化热泵干燥苹果片的干燥特性[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 228 – 236. LIU Yunhong, MIAO Shuai, SUN Yue, et al. Drying characteristics of apple slices during contact ultrasound reinforced heat pump drying[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 228 – 236. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160230&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160230&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.030. (in Chinese)
- [43] 朱文学, 尤泰斐, 白喜婷, 等. 基于低场核磁的马铃薯切片干燥过程水分迁移规律研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 364 – 370. ZHU Wenxue, YOU Taifei, BAI Xiting, et al. Analysis of moisture transfer of potato slices during drying using low-field NMR[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 364 – 370. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181243&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181243&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.043. (in Chinese)
- [44] GOWEN A A, ABU-GHANNAM N, FRIAS J, et al. Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave – hot-air drying[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(1): 129 – 137.
- [45] LAHSASNI S, KOUHILA M, MAHROUZ M, et al. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(2): 173 – 179.
- [46] UNAL H G, SACILIK K. Drying Characteristics of hawthorn fruits in a convective hot-air dryer[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2011, 35(2): 272 – 279.
- [47] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 150 – 155. CHU Wenjing, SHENG Danmei, ZHANG Nan, et al. Hot-air drying of red-fleshed pitaya: kinetic modelling and quality changes[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 150 – 155. (in Chinese)
- [48] 李雨. 典型冶金物料的微波及组合干燥应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [49] 于海明. 山楂微波热风耦合干燥数学模型研究及干燥设备设计[D]. 长春: 吉林大学, 2015.