

吴钊龙, 张小叶, 黄纪民, 等. 黄精片间歇微波干燥特性及模型拟合[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 156–162.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.15.025

黄精片间歇微波干燥特性及模型拟合

吴钊龙^{1,2,3}, 张小叶^{1,4}, 黄纪民^{1,2,3}, 李浩^{1,4}, 孙文波^{1,2,3}, 李秉正^{1,2,3}, 黄志民^{1,2,3}

(1. 广西科学院广西生物炼制重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 广西科学院非粮生物质酶解国家重点实验室, 广西南宁 530007;
3. 广西中科微波先进制造产业技术研究院, 广西南宁 530007; 4. 南宁学院机电与质量技术工程学院, 广西南宁 530200)

摘要:为兼顾黄精的干燥效率和产品品质,以黄精片为研究对象,探讨微波间歇干燥技术对黄精片的干燥效果,以期获得品质较好的黄精干片,为黄精片微波间歇干燥工艺参数的选择提供依据。通过研究不同微波功率、间歇时间、装载量、切片厚度条件下黄精片间歇微波干燥特性,建立干燥动力学模型。结果表明,黄精片在间歇微波干燥过程中可分为加速干燥、恒速干燥和降速干燥 3 个阶段;微波功率越高、间歇时间越短、装载量越小和切片厚度越薄,干燥速率越大,所需的干燥时间越短;黄精片间歇微波干燥全过程有效水分扩散系数为 $(1.013\ 2 \sim 6.160\ 3) \times 10^{-9}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。

Page 模型最符合黄精片间歇微波干燥 ($R^2 = 0.987$),对于黄精片干燥过程的预测、调控和工艺优化具有重要意义。

关键词:黄精片;间歇微波;有效水分扩散系数;动力学;模型;干燥特性

中图分类号:TS205;R282.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)15-0156-06

黄精 (*Polygonatum sibiricum*) 是百合科黄精属多年生草本植物,一般以其干燥根茎入药^[1]。研究发现,黄精中主要含黄精多糖、甾体皂苷、萜醌类化合物、挥发油、生物碱、木质素、维生素和多种氨基酸等化合物,具有宽中益气、滋补强身的养生功效,已被国家列为药食两用中药,被广泛用作功能性食品及滋补药品^[2-3]。

目前,黄精的干燥加工主要采用热风干燥和自然晒干方法,都存在干燥时间长、能耗大、干燥品质差等不足^[4]。与其相比,微波加热是依靠物体吸收微波并将其转换成热能的加热方式,物料干燥速度快、易于控制,且干后品质和能量利用率高^[5]。然而,连续微波干燥容易导致物料过热,从而对产品品质产生不利影响。间歇微波干燥可以在一定程度上弥补上述不足,已被广泛应用于农产品干燥中^[6],但目前鲜见将其用于黄精干燥的报道。

本研究拟开展黄精片的间歇微波干燥分析,考察微波功率、间歇时间、装载量、切片厚度 4 个条件

对微波干燥特性的影响,在此基础上对数据进行模型拟合,构建关于黄精片间歇微波干燥的数学模型,并对试验结果进行验证,为合理选择黄精片的干燥工艺参数提供依据。

1 材料与方法

1.1 原料与处理

新鲜黄精于 2020 年 11 月 20 日购自广西壮族自治区百色市隆林各族自治县,购买后运回广西中科微波先进制造产业技术研究院中试车间清洗,挑选无病虫害或机械损伤的新鲜黄精,清洗除去表面的泥沙和杂质并沥干水分后切片。

1.2 试验设备

Webox-A6 型微波干燥机,购自株洲市微朗科技有限公司;JJ1000 型电子天平,购自常熟市双杰测试仪器厂;DHS-20A 型水分测定仪,购自力辰科技宁波有限公司。

1.3 干燥

选取大小均匀的黄精片单层摆放在塑料网盘上,放入微波干燥机内,并按表 1 的参数条件组合依次进行间歇微波干燥试验。参照预试验结果,将单次微波辐照时间固定为 1 min。通过单因素试验,考察微波功率、间歇时间、装载量和切片厚度等因素对干燥特性及其动力学的影响。利用间歇时间称质量并记录干燥过程中的质量变化,当湿基含水量 $\leq 10\%$ 时停止干燥^[7]。

收稿日期:2021-08-19

基金项目:广西科技计划(编号:桂科 AB18294028);贺州市创新驱动发展专项(编号:贺科创 ZX0710001、贺科创 CX2009009)。

作者简介:吴钊龙(1995—),男,广西梧州人,硕士,研究实习员,主要从事农产品加工研究。E-mail:wuzhaolong@gxas.cn。

通信作者:黄志民,博士,研究员,主要从事生物物理研究,E-mail:hzming@163.com;黄纪民,硕士,工程师,主要从事农产品和食品加工研究,E-mail:huangjimin@gxas.cn。

表 1 试验参数设计

试验编号	微波功率 (W)	间歇时间 (min)	装载量 (g)	切片厚度 (mm)
1	250	1	100	4
2	300	1	100	4
3	350	1	100	4
4	400	1	100	4
5	350	0.5	100	4
6	350	1	100	4
7	350	1.5	100	4
8	350	1	50	4
9	350	1	100	4
10	350	1	150	4
11	350	1	100	2
12	350	1	100	4
13	350	1	100	6

1.4 干燥参数的测试与计算方法

1.4.1 初始含水率 通过用 DHS-20A 型快速水分测定仪测定黄精的含水量,得到黄精平均初始含水量为 69.77%。

1.4.2 干基含水量 相关公式:

$$M_t = (m_t - m) / m. \quad (1)$$

式中: M_t 为干燥到 t 时刻的物料干基含水量, g/g; m_t 为干燥到 t 时刻的物料质量, g; m 为绝干物料的质量, g^[8]。

1.4.3 干燥速率 相关公式:

$$DR = (M_{t+\Delta t} - M_t) / \Delta t. \quad (2)$$

式中: DR 为干燥速率, g/(g·min); Δt 为相邻 2 次测定的时间间隔, min; $M_{t+\Delta t}$ 为干燥至 $t + \Delta t$ 时刻的物料干基含水量, g/g; M_t 为干燥至 t 时刻的物料干基含水量, g/g^[9]。

1.4.4 水分比 相关公式:

$$MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e). \quad (3)$$

式中: MR 为水分比; M_e 为干燥平衡时物料的干基含水量, g/g; M_0 为物料的初始干基含水量, g/g。

由于黄精的平衡干基含水量 M_e 远远小于 M_0 和 M_t , 通常可以忽略不计, 因此可将公式(3)简化成公式(4)进行计算^[10]:

$$MR = M_t / M_0. \quad (4)$$

1.4.5 有效水分扩散系数 相关公式:

$$MR = 8 \exp(-\pi^2 t D_{\text{eff}} / L^2) / \pi^2. \quad (5)$$

式中: L 为黄精切片厚度的一半, mm; t 为干燥时间, s; D_{eff} 为有效水分扩散系数, m²/s。

以 $\ln MR$ 为纵坐标、干燥时间(t)为横坐标作直

线方程,将直线方程的斜率 k 代入公式(6)可求出有效水分扩散系数^[11],相关公式:

$$D_{\text{eff}} = -kL^2 / \pi^2. \quad (6)$$

1.5 干燥模型的拟合

根据吴钊龙等选用的 5 种最常见的干燥模型^[12]对黄精的干燥模型进行线性拟合。

1.6 数据分析

用 SPSS 19.0 对黄精片间歇微波干燥试验数据进行分析处理,用 Origin 8.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 黄精片间歇微波干燥特性

2.1.1 微波功率对干燥特性的影响 在间歇时间为 1 min、装载量为 100 g、切片厚度为 4 mm 的条件下,不同微波功率下的黄精片间歇微波干燥曲线和干燥速率曲线如图 1 所示。

由图 1-a 可以看出,随着干燥时间的延长,不同微波功率处理的黄精片水分比持续降低。微波功率越高,干燥过程中水分比的变化越大,水分比降至趋于平缓所需的干燥时间越短。当微波功率为 400 W 时,达到平缓所需的时间为 20 min;而当微波功率为 250 W 时,达到平缓所需的时间为 50 min,后者时间是前者的 2.5 倍。由此可见,在一定的微波功率范围内,适当地提高微波功率可以缩短干燥时间。

由图 1-b 可以看出,在 4 个不同微波功率处理下,微波功率越大,干燥速率越高。当微波功率为 350~400 W 时,干燥速率曲线只存在加速、降速 2 个阶段;当微波功率为 250~300 W 时,干燥速率曲线存在加速、恒速、降速 3 个阶段。随着微波功率的增大,单位质量物料产生热量的速度更快,与周围热空气间形成较大的水分梯度,黄精片内部形成的蒸汽压越大,其向外扩散的驱动力也越大^[13]。

2.1.2 间歇时间对干燥特性的影响 在微波功率为 350 W、装载量为 100 g、切片厚度为 4 mm 的条件下,不同间歇时间处理的黄精片的微波干燥曲线和干燥速率曲线如图 2 所示。

由图 2-a 可以看出,在不同间歇时间处理下,黄精片微波干燥曲线的线形相似,且间歇时间越大,黄精片的干燥曲线斜率越小,干燥至水分比降至趋于平缓所需的时间越长。当间歇时间分别为 0.5、1.0、1.5 min 时,所需的干燥时间分别为 22、28、35 min。当间歇时间过短时,随着干燥的进行,会出

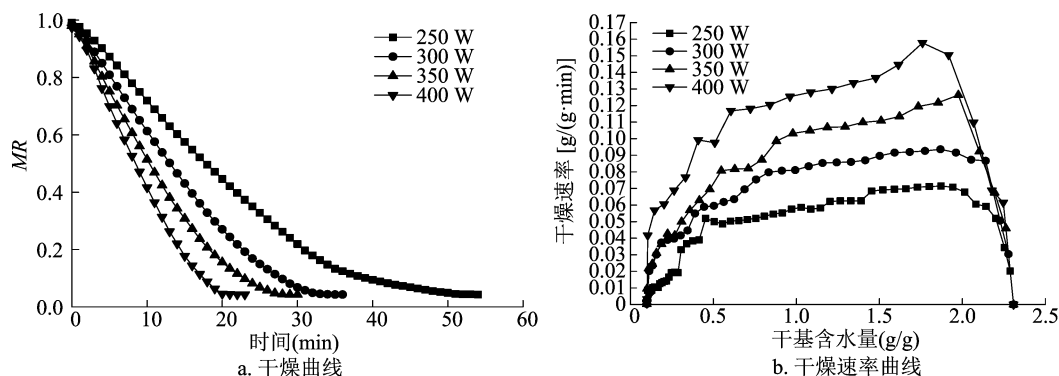


图1 不同微波功率下黄精片的干燥曲线和干燥速率曲线

现局部过热现象,导致黄精片焦糊。当间歇时间过长时,所需的总干燥时间长,并且会增加能耗。

由图 2-b 可以看出,3 条不同间歇时间的干燥速率曲线均有明显的加速、降速 2 个阶段;间歇时间越长,干燥速率越小。在微波加热时增加间歇时间

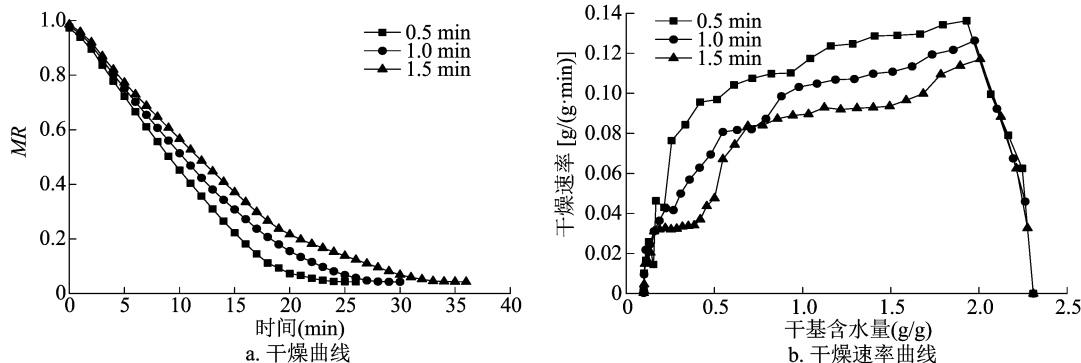


图2 不同间歇时间下的干燥曲线和干燥速率曲线

2.1.3 装载量对干燥特性的影响 在微波功率为 350 W、间歇时间为 1 min、切片厚度为 4 mm 的条件下,不同装载量的黄精片间歇微波干燥曲线和干燥速率曲线如图 3 所示。

由图 3-a 可以看出,随着干燥时间的延长,不同装载量条件下的水分比呈现下降的趋势;装载量越小,干燥曲线越陡峭,水分比降至趋于平缓所需的干燥时间越短。当装载量为 50 g 时,水分比达到平缓所需的时间为 13 min,而当装载量为 150 g 时,水分比达到平缓所需时间为 32 min,后者是前者的 2.46 倍;这与蓝莓^[15]、秋葵^[16]和西芹^[17]的微波干燥曲线具有相同的规律。

由图 3-b 可以看出,当装载量为 150 g 时,干燥过程有明显的加速阶段、恒速阶段和降速阶段;当装载量为 50、100 g 时,干燥过程有明显的加速阶段、降速阶段。干燥装载量越小,干燥速率越快,变化趋势也越快,恒速阶段越不明显。这是由于随着黄精片装载量的减少,单位质量黄精片所分配到的

这一步骤,可为黄精片内部水分的重新分布及向表面扩散提供时间,从而有效防止过热或焦化,保证干燥品质,而当采用微波连续加热时,虽然物料能在短时间内达到脱水效果,但干燥过程升温过快,易超过其耐热温度,从而影响产品质量^[14]。

微波功率增大,物料产生热量的速度更快,但干燥装载量越小,加工效率越低,在实际生产中,干燥装载量还需进一步考察^[18]。

2.1.4 切片厚度对干燥特性的影响 在微波功率为 350 W、间歇时间为 1 min、装载量为 100 g 的条件下,不同切片厚度的黄精片间歇微波干燥曲线和干燥速率曲线如图 4 所示。

由图 4-a 可以看出,随着干燥时间的增加,黄精片的水分比呈现降低的趋势,且黄精的切片厚度越小、干燥曲线越陡峭,水分比降至趋于平缓所需的干燥时间越短。当切片厚度分别为 2、4、6 mm 时,干燥时间分别为 20、27、32 min。

由图 4-b 可以看出,不同切片厚度所对应的干燥速率曲线均有明显的加速、降速 2 个阶段;切片厚度越薄,干燥速率越高。因为对于一定体积的物料而言,随着切片厚度的减小,热量从外到内传递的距离缩短,也缩短了热量从内到外扩散的距离,内部水分迁移的阻力变小,从而加快了热量、水分的传递

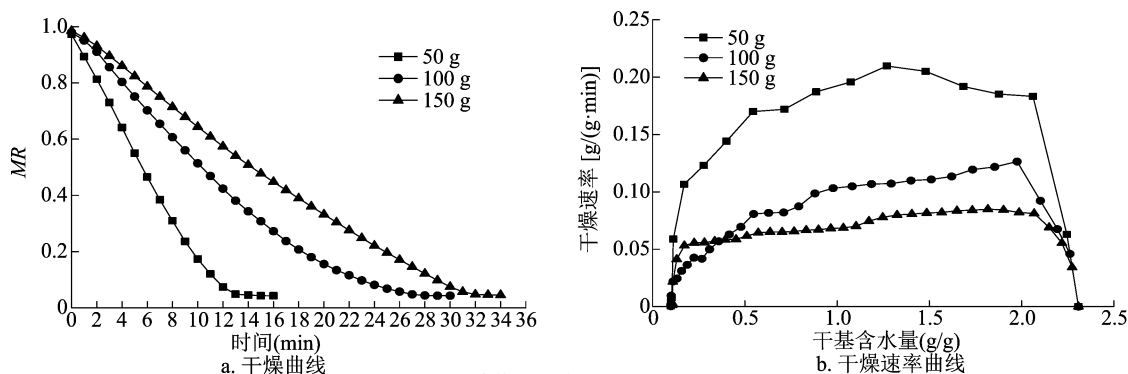


图3 不同装载量下的干燥曲线和干燥速率曲线

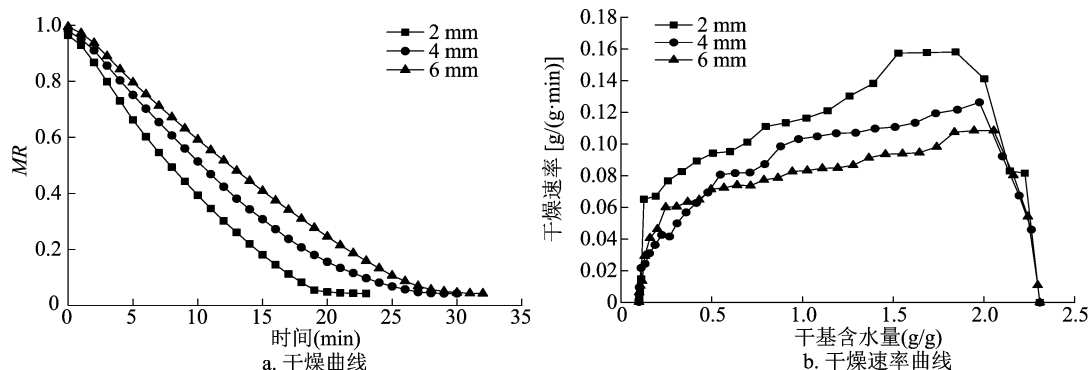


图4 不同厚度下的干燥曲线和干燥速率曲线

速度,此外,传质与传热的速度也加快,从而提高了干燥速率^[19]。

2.1.5 不同干燥条件下黄精片的有效水分扩散系数 由表2可知,有效水分扩散系数在 $1.013\ 2 \times 10^{-9} \sim 6.200\ 9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间,其中功率为 350 W、间歇时间为 1 min、装载量为 100 g、切片厚度为 6 mm 条件下的有效水分扩散系数最高,为 $6.200\ 9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,在食品干燥的有效水分扩散系数为 $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内^[20]。 D_{eff} 随着微波功率和切片厚度的增加而增大,随着间歇时间、装载量的增加而减小。由此可见,在干燥过程中,提高微波功率和切片厚度、降低间歇时间和装载量可以提升有效水分扩散系数,加快黄精片间歇微波干燥的质热传递^[21]。在实际应用中,可通过调节微波功率、间歇时间、装载量和切片厚度来改变干燥过程。

2.2 黄精片间歇微波干燥模型的建立

2.2.1 黄精片间歇微波干燥过程试验数据的拟合

由图1~图4可以看出,在黄精片间歇微波干燥过程中, $MR-t$ 是非线性关系,说明Wang and Singh模型不适合用来描述黄精片间歇微波干燥,拟合方程的 R^2 为0.920。根据其余4种干燥动力学模型的线性化表达式,绘制不同条件下以 $-\ln MR$ 、 $\ln(-\ln MR)$ 为纵坐标, t 、 $\ln t$ 分别为对应横坐标的黄

表2 不同干燥条件下的有效水分扩散系数

试验编号	$\ln MR-t$ 关系式	r^2	有效扩散系数 ($\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)
1	$\ln MR = -0.001\ 1t + 0.314\ 4$	0.984\ 7	1.783\ 5
2	$\ln MR = -0.001\ 6t + 0.378\ 3$	0.964\ 6	2.593\ 8
3	$\ln MR = -0.001\ 9t + 0.335\ 9$	0.974\ 3	3.080\ 2
4	$\ln MR = -0.002\ 5t + 0.390\ 8$	0.951\ 7	4.052\ 9
5	$\ln MR = -0.002\ 3t + 0.358\ 8$	0.969\ 8	3.728\ 6
6	$\ln MR = -0.001\ 9t + 0.335\ 9$	0.974\ 3	3.080\ 2
7	$\ln MR = -0.001\ 6t + 0.282\ 7$	0.983\ 7	2.593\ 8
8	$\ln MR = -0.003\ 8t + 0.352\ 1$	0.958\ 8	6.160\ 3
9	$\ln MR = -0.001\ 9t + 0.335\ 9$	0.974\ 3	3.080\ 2
10	$\ln MR = -0.001\ 5t + 0.393\ 5$	0.920\ 7	2.431\ 7
11	$\ln MR = -0.002\ 5t + 0.342\ 9$	0.958\ 9	1.013\ 2
12	$\ln MR = -0.001\ 9t + 0.335\ 9$	0.974\ 3	3.080\ 2
13	$\ln MR = -0.001\ 7t + 0.411\ 5$	0.946\ 7	6.200\ 9

精片间歇微波干燥过程的关系图。

由图5可以看出,在黄精片间歇微波干燥过程中, $(-\ln MR)-t$ 是非线性关系,Lagarithmic、Henderson and Pabis、Newton 3种模型拟合方程的 R^2 分别为0.956、0.913、0.894。由此可见,这3类模型都不适合用来描述黄精片间歇微波干燥。

由图6可以看出,在黄精片微波干燥过程中, $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 是线性关系,可见Page模型对预

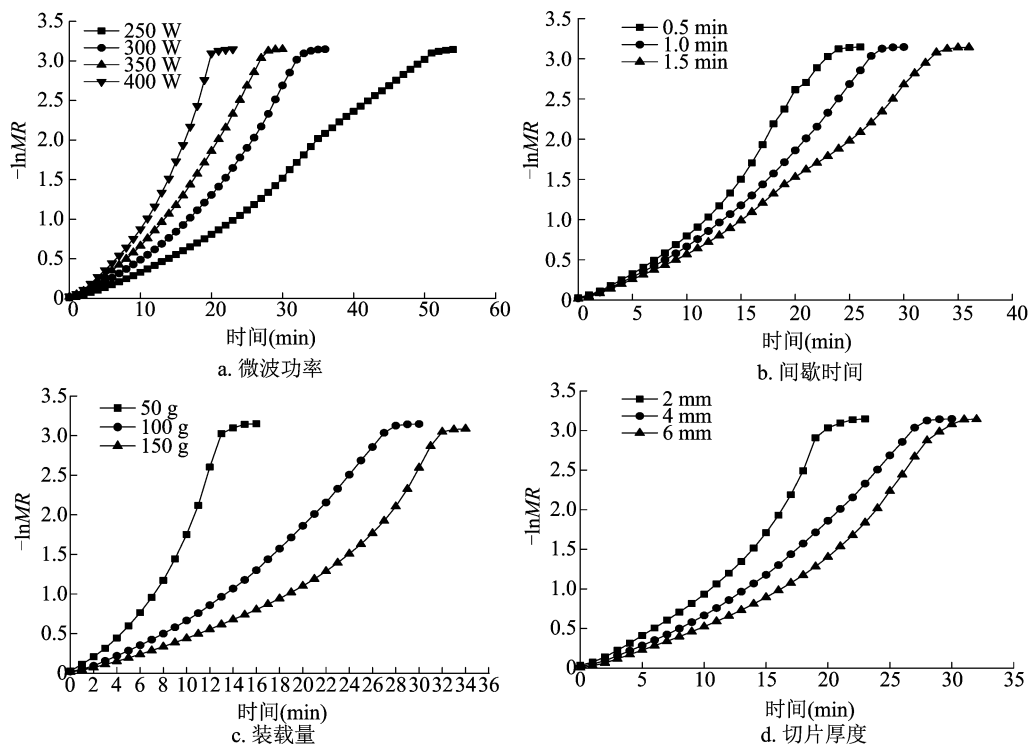


图5 不同微波功率、间歇时间、装载量、切片厚度下的 $(-\ln MR)-t$ 曲线

测黄精片间歇微波干燥具有良好的适应性。因此,采用 Page 模型 $\ln(-\ln MR) = \ln K + n \ln t$ 建立黄精片间歇微波干燥动力学,令:

$$\ln K = a + bP + cX + dM + eH;$$

$$n = f + gP + hX + iM + jH.$$

式中: P 为微波功率, W; X 为间歇时间, min; M 为装载量, g; H 为切片厚度, mm; $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ 为待定系数,可得到如下公式:

$$\ln(-\ln MR) = a + bP + cX + dM + eH + (f + gP + hX + iM + jH) \ln t.$$

将不同微波功率、不同间歇时间、不同装载量和不同切片厚度试验所得数据依次代入上式,通过 SPSS 19.0 对试验数据进行拟合,得到待定系数 $a = -3.105, b = 0.007, c = -0.220, d = -0.014, e = -0.225, f = 1.049, g = 0.000, h = -0.069, i = 0.001, j = 0.034$ 。

将求得的系数代入 $\ln(-\ln MR) = a + bP + cX + dM + eH + (f + gP + hX + iM + jH) \ln t$, 得到回归方程:

$$\ln(-\ln MR) = -3.105 + 0.007P - 0.220X - 0.014M - 0.225H + (1.049 - 0.069X + 0.001M + 0.034H) \ln t.$$

由于 $\ln(-\ln MR) = \ln K + n \ln t$, 即可求得:

$$k = \exp(-3.105 + 0.007P - 0.220X - 0.014M -$$

$$0.225H), n = 1.049 - 0.069X + 0.001M + 0.034H.$$

回归方程的 $F = 3\,224.987, P < 0.001, R^2 = 0.987$, 说明黄精片间歇微波干燥过程与 Page 模型成显著相关性,且拟合度较高,证明 Page 模型适用于描述黄精片间歇微波干燥过程。

2.2.2 模型检验 为了检验所选模型的准确性,设置如下试验条件进行验证:微波功率为 400 W,间歇时间为 1 min,装载量为 100 g,切片厚度为 2 mm。如图 7 所示,对 Page 方程的试验值与拟合值进行对比,得出二者拟合比较好, Pearson 相关系数为 0.999,说明 Page 模型能够较好地反映和预测黄精片间歇微波干燥的规律。

3 结论与讨论

黄精片间歇微波干燥过程中主要包括加速、恒速和降速 3 个阶段。微波功率越高,间歇时间越短、装载量越小、切片厚度越薄,其干燥速率越快,所需的干燥时间越短。

在微波功率为 250 ~ 400 W、间歇时间为 0.5 ~ 1.5 min、装载量为 50 ~ 150 g、厚度为 2 ~ 6 mm 的范围内,黄精片间歇微波干燥的有效水分扩散系数为 $1.013\,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \sim 6.160\,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,其中功率为 350 W、间歇时间为 1 min、装载量为 100 g、切片厚度为 6 mm 条件下的有效水分扩散系数最高,

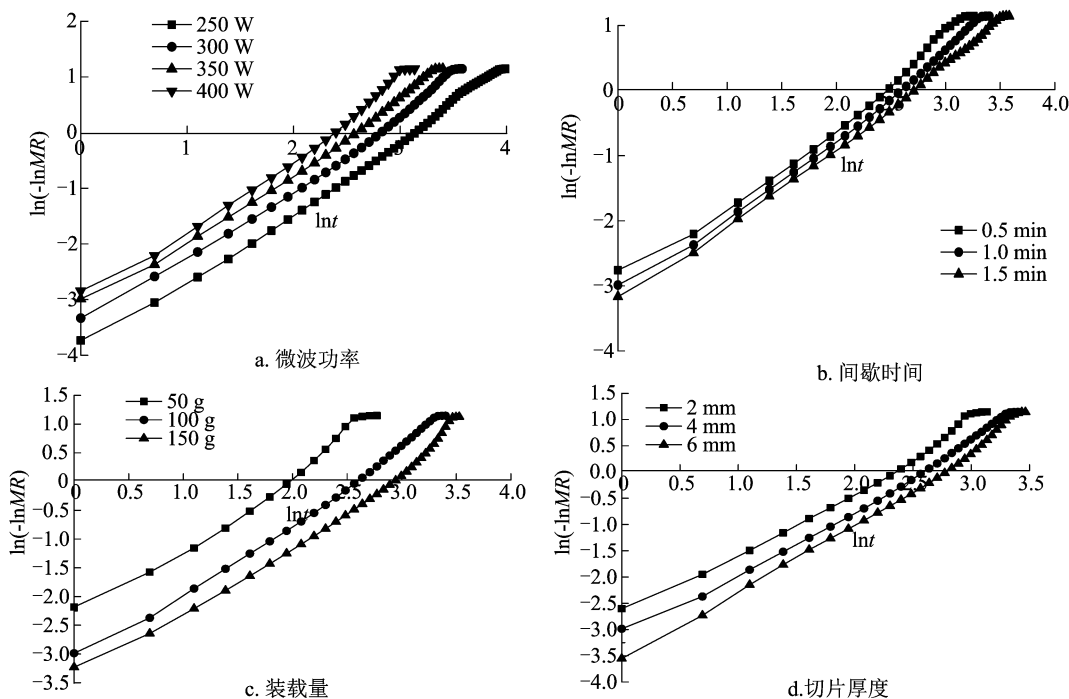
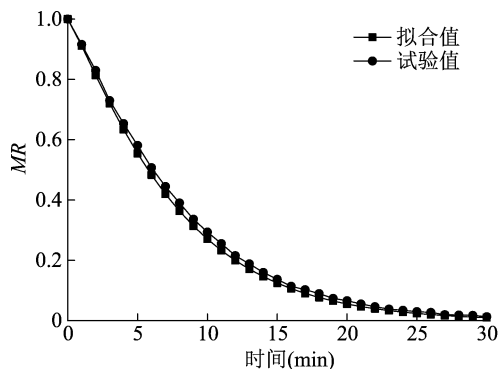
图6 不同微波功率、间歇时间、装载量、切片厚度下的 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 曲线

图7 动力学模型检验曲线

为 $6.2009 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

通过对 5 种常见的动力学模型进行拟合分析,发现 Page 模型最适合描述黄精片间歇微波干燥过程中水分变化规律的干燥模型,得到拟合方程为 $\ln(-\ln MR) = -3.105 + 0.007P - 0.220X - 0.014M - 0.225H + (1.049 - 0.069X + 0.001M + 0.034H)\ln t$ 。通过该模型可以在确定微波功率、间歇时间、装载量和切片厚度的情况下准确地预测到任意时刻黄精片水分比的含量。

参考文献:

- [1]王巧莲. 黄精根茎化学成分及其抗炎活性研究[D]. 北京:北京化工大学,2016.
- [2]彭星星. 黄精属互生叶类本草植物生物学特性与药材形态相关性研究[D]. 合肥:安徽中医药大学,2018.
- [3]Wang S Y, Yu Q J, Bao J K, et al. *Polygonatum cyrtoneura* lectin, a

potential antineoplastic drug targeting programmed cell death pathways [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2011, 406(4): 497-500.

- [4]衡银雪,郑旭煦,殷钟意,等. 不同干燥方法对黄精干燥特性和品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(7): 158-161, 167.
- [5]Li Z F, Raghavan G S V, Orsat V. Optimal power control strategies in microwave drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(3): 263-268.
- [6]İzli N, Polat A. Intermittent microwave drying of apple slices: drying kinetics, modeling, rehydration ratio and effective moisture diffusivity [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 26(1): 32-41.
- [7]衡银雪,郑旭煦,殷钟意,等. 黄精微波真空-热风联合干燥工艺研究[J]. *应用化工*, 2018, 47(5): 952-955.
- [8]吴钊龙,黄纪民,林芳,等. 低场核磁共振方法下热泵干燥过程中蚕蛹的品质变化[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1-9 [2021-09-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028466>.
- [9]吴钊龙,林芳,陈振林,等. 蚕蛹变温压差膨化干燥特性及其动力学模型研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(10): 88-95.
- [10]陈振林,郭婷,赵广河,等. 红瓜子薄层热风干燥特性及其动力学研究[J]. *食品与机械*, 2014, 30(6): 23-26.
- [11]方良材,吴钊龙,刘梦姣,等. 牛大力切片热风干燥特性及其动力学模型建立[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(6): 1683-1691.
- [12]吴钊龙,林芳,陈振林,等. 蚕蛹热泵干燥特性及其动力学模型研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(18): 1-6.
- [13]盘喻颜,段振华,刘艳,等. 火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 195-201.
- [14]黄纪民,吴钊龙,李浩,等. 西林火姜片微波间歇干燥特性及品质变化[J/OL]. *食品工业科技*: 1-20 [2021-09-29]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050255>.
- [15]程丽君,蔡敬民,胡勇,等. 蓝莓微波干燥动力学模型的研究

林洁鑫, 颜廷宇, 邵淑贤, 等. 基于 UPLC-MS/MS 的不同产地金观音红茶代谢组学分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 162-168.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.15.026

基于 UPLC-MS/MS 的不同产地金观音 红茶代谢组学分析

林洁鑫¹, 颜廷宇¹, 邵淑贤¹, 王鹏杰¹, 叶乃兴¹, 金 珊¹, 吴芹瑶³, 郑德勇², 杨江帆¹

(1. 福建农林大学园艺学院/茶学福建省高校重点实验室, 福建福州 350002;

2. 福建农林大学材料工程学院, 福建福州 350002; 3. 福建商学院, 福建福州 350002)

摘要:为探究不同产地红茶代谢产物的差异, 采用超高效液相色谱串联质谱(UPLC-MS/MS)的广泛靶向代谢组测定方法, 对福建省福安市、尤溪县产红茶中的代谢物进行比较分析。结果表明, 利用代谢组学方法在 2 个产地的红茶中鉴定出共 936 种代谢物, 通过主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)发现不同产地的红茶存在显著差异, 并筛选出马来酸、对香豆酸、L-天冬酰胺、烟酸腺嘌呤二核苷酸和杨梅素-3-O-葡萄糖苷等 96 种显著差异代谢物。尤溪红茶中有 50 种差异代谢物的相对含量高于福安红茶, 其中氨基酸及其衍生物、生物碱、黄酮类和酚酸类等代谢物对于 2 个产地红茶的不同滋味品质形成可能具有重要贡献。代谢通路分析发现, 苯丙氨酸代谢通路和黄酮类生物合成通路在代谢途径中发挥主要作用, 苯丙酮酸、2-羟基苯乙酸、2-苯乙胺、N-乙酰-L-苯丙氨酸、2-苯乙醇、圣草酚、表儿茶素、杨梅素、没食子儿茶素、二氢槲皮素和绿原酸等可以作为鉴别不同产地红茶的参考指标。本研究结果可为红茶产地鉴别提供理论参考。

关键词:红茶; 代谢组学; 差异代谢物; 滋味; 产地

中图分类号: TS272.7; O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2022)15-0162-07

红茶是我国六大茶类之一, 属于全发酵茶, 由于其独特的滋味和香气成为世界上消费量最大的茶类^[1]。福建是红茶的发明地, 其主产区分布在闽东和闽中一带^[2], 由于茶叶的品质与生长环境密切

相关, 使得不同产地的红茶具有特定的品质特征^[3-4]。随着人们生活水平提高, 消费者对确认茶产品原产地的需求明显增加^[5], 目前常用的茶叶感官审评方法, 不仅其结果易受多种因素影响^[6], 也很难据此判别茶叶的产地。因此, 从保护消费者利益与福建茶叶区域品牌建设的需要出发, 探究一种客观、科学的茶叶产地与品质鉴别技术十分必要。

气相色谱-质谱联用法(GC-MS)、液相色谱-质谱联用法(LC-MS)、近红外光谱(NRIS)、稳定性同位素(IRMS)、矿物质元素测定等检测技术在鉴定食品的产地与品质方面取得一定成功, 国内外学者开始将此类技术手段引入到茶叶的产地判别与品质鉴别研究中, 并取得了重要进展^[7-11]。代谢组学作为一门新兴综合性技术, 通过高通量检测和

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 福建省“2011 协同创新中心”中国乌龙茶产业协同创新中心专项(编号: 闽教科[2015]75 号); 福建农林大学茶产业链科技创新与服务体系建设项目(编号: K1520005A06); 福建张天福茶叶发展基金会科技创新基金(编号: FJZTF01)。

作者简介: 林洁鑫(1996—), 女, 福建福安人, 硕士研究生, 主要从事茶叶功能成分化学与综合利用研究。E-mail: ljx5880lucas@163.com。

通信作者: 杨江帆, 博士, 教授, 主要从事茶叶经济与文化及茶叶资源与利用研究, E-mail: yjf3001@163.com; 郑德勇, 硕士, 副教授, 主要从事天然产物提取与分析研究, E-mail: ffczdy@163.com。

[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(5): 78-82.

[16] Dadali G, Apar D K, Ozbek B. Estimation of effective moisture diffusivity of okra for microwave drying[J]. Drying Technology, 2007, 25(9): 1445-1450.

[17] Vega-mercado H, Gongdora-nieto M M, Barbosa-canvas G V. Advances in dehydration of foods[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 271-289.

[18] 毛志幸, 孙 辉, 陈宗道. 白果微波干燥特性及干燥动力学模型

研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 11-16, 21.

[19] Lee D Y, So J D, Jung H M, et al. Microwave drying characteristics of squash slices[J]. Korean Journal of Agricultural Science, 2018, 45(4): 847-857.

[20] 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.

[21] 李叶贝, 任广跃, 屈展平, 等. 马铃薯小麦复合面条热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(10): 7-15.