莲子微波真空干燥特性及其微观结构的分形特征

赵莹婷，王为为，庄玮婧，郑宝东，田玉庭
（1.福建农林大学食品科学学院，福建福州 350002）
（2.福建省特种淀粉品质科学与加工技术重点实验室，福建福州 350002）

摘要：本文研究了不同干燥参数（微波强度和真空度）对莲子微波真空干燥特性、微观结构和宏观物性（收缩率和复水率）的影响，利用盒计数法定量描述微波真空干燥莲子微观结构的分形特征，并以标准分形维数($\Delta FD/FD_0$)来构建微波真空干燥莲子宏观物性（收缩率和复水率）与微观结构间的函数关系。结果表明，莲子干燥至平衡含水量所需时间随微波强度或真空度的增加而减小。莲子收缩率随微波强度的增加呈现先减小后增加的趋势，而复水率则呈现出先增加后减少的趋势；随真空度的增加，莲子收缩率逐渐减小，而复水率呈现出先增加后减少的趋势。分析维度可定性描述微波真空干燥莲子的微观结构，分形维数越大，莲子的复水率和收缩率就越大，同时分形维数与复水率和收缩率间具有良好的线性关系，可用分析维度来推测莲子的物理特性。

关键词：干燥特性；分形分析；莲子；微波真空干燥；结构-质量关系
文章篇号：1673-9078(2016)8-213-218 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.8.032

Microwave Vacuum Drying Characteristics of Lotus Seeds and the Fractal Characteristics of Their Microstructures

ZHAO Ying-ting, WANG Wei-wei, ZHUANG Wei-jing, ZHENG Bao-dong, TIAN Yu-ting
(1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China) (2.Fujian Provincial Key Laboratory of Quality Science and Processing Technology in Special Starch, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Lotus seeds are dried for storage. The effects of microwave vacuum drying (MVD) on lotus seeds were assessed. The effects of different drying parameters (microwave power density and degree of vacuum) on the drying characteristics, microstructure, and physical properties (shrinkage and rehydration) of lotus seeds were studied. A box counting method (BCM) was used to quantitatively describe the fractal characteristics of the microstructure of dried lotus seeds. The normalized change of the fractal dimension ($\Delta FD/FD_0$) was used to construct the functional relationship between physical properties, including shrinkage and rehydration, and the microstructure of lotus seeds dried by MVD. The results indicated that the time required for lotus seeds to be dried to equilibrium moisture content decreased with increasing microwave power density or degree of vacuum. With increasing microwave power density, the shrinkage of lotus seeds initially decreased but subsequently increased. Additionally, the rehydration of lotus seeds initially increased but subsequently decreased. The shrinkage of lotus seeds decreased gradually with an increase in the degree of vacuum (from -60 kPa to -90 kPa). However, the rehydration of lotus seeds initially increased and subsequently decreased. The analysis of dimension could qualitatively describe the microstructure of the lotus seeds dried by MVD. Shrinkage and rehydration of lotus seeds increased with an increase in $\Delta FD/FD_0$. The higher the fractal dimension, the higher the degrees of lotus seed shrinkage and rehydration. Furthermore, a linear relationship was observed between $\Delta FD/FD_0$ and shrinkage/rehydration, and the fractal dimension analysis could be used to predict the physical properties of lotus seeds.

Key words: drying characteristics; fractal analysis; lotus seed; microwave vacuum drying; structure-quality relationship

收稿日期：2016-01-04
基金项目：国家自然科学基金（31401616）；福建省高校产学合作科技重大项目（2015N501）；福建农林大学“校杰出青年科研人才”专项基金（xjq201418）；福建农林大学科技创新团队支持计划（cxtd12009）
作者简介：赵莹婷（1993－），女，硕士研究生，研究方向：农产品加工与贮藏
通讯作者：田玉庭（1979－），男，博士，副教授，研究方向：农产品加工与贮藏

莲子（*Nelumbo nucifera* Gaertn）是十二种多年生水生植物之一，其作为一种蔬菜在澳大利亚、中国、日本和印度等国被广泛种植。在我国，莲子主要分布在福建、江西、湖北、江苏等地。自古以来，莲子作为一种高级滋补食品，在民间广为食用，据《本草纲目》记载，莲子具有“久服轻身耐苦，不饥延年，益心肾，固精气，强筋骨，补虚损，利耳目”之功效，现已被我国卫生部列入 87 种药食两用食物名列[1]。新

鲜莲子含水率介于65%~70%之间，组织中多酚氧化酶活性较高，极易发生褐变或受微生物侵染而降低其食用品质。因此，传统莲子的贮存保鲜常以脱水干制为主。

干燥可快速移除莲子内部水分，降低自身酶活，防止外源微生物侵染，从而延长其保质期。微波真空干燥集合微波干燥与真空干燥的各自优势：微波可直接辐射到物料内部，使物料由内向外快速均匀的受热；真空降低水分沸点，使物料自身温度维持在较低水平[2]。微波真空干燥因时间短、能耗低、且能最大限度地保持物料品质，而被广泛应用于果蔬原料的干制加工领域。前期研究发现，不同微波真空干燥条件导致莲子微观结构差异显著[2]，尽管微观结构可通过电镜来表征，但电镜图谱很难做到定量描述。为此，有学者引入分形分析来定量描述干制品的微观特性[3]。

目前，分形分析已用于定量描述部分果蔬干品的微观结构，如雪莲果[4]，荔枝[5]，胡萝卜[6]等。这些果蔬仍以传统的热风干燥为主，而微波真空干燥莲子仍未见报道。基于此，本文拟探究干燥参数（微波强度和真空度）对莲子微波真空干燥特性、宏观物性（收缩率和复水率）以及微观结构的影响，运用分形分析方法来表征不同干燥条件所制莲子的微观特性，以此构建其微观结构和宏观物性间的数学关系，以期为莲子微观真空干燥工艺优化和产品品质控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 莲子

莲子：花排莲，带莲蓬采集于福建建宁县，当天运抵福州，置于20 ℃室温以下并保持室内湿度，用时剥壳、去膜、去芯。

1.1.2 主要仪器设备

KL-4微波真空干燥设备（广州凯棱工业用微波设备有限公司及福建农林大学联合监制）；DHG-9053A型电热恒温鼓风干燥箱（上海精宏设备有限公司）；M700微波炉(广东美的微波炉制造有限公司)；PL602-S型电子天平（梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司）；SFY-6卤素快速水分测定仪（深圳冠亚科技有限公司）；Nova NanoSEM 230型场发射扫描电镜（美国FEI公司）。

1.2 方法

1.2.1 干燥方法

分别采用热风干燥、微波干燥和微波真空干燥三种干燥方式将同一批次等质量的莲子干燥至安全含水率（含水率≤13%）后，测定莲子微观结构和宏观物性（收缩率和复水率）。

微波真空干燥：选取微波强度和真空度为试验因素。微波强度是通过微波功率和干燥物料质量得到的，故又称单位质量接收功率，其计算公式如下：

$$P=\frac{W}{m_0}$$

式中：P-微波强度，W/g；W-微波功率，W；m_0-物料初始质量，g。

固定真空度为-80 kPa，选取微波强度为5、10、20 W/g，研究微波强度对干燥特性的影响；固定微波强度为15 W/g，选取真空度为-60、-70、-80，-90 kPa，研究真空度对干燥特性的影响。

1.2.2 试验指标的测定

含水率的测定：物料含水率测定参照GB/T 5009.3-2003，采用干基含水率表示法。

收缩率的测定：用石英砂置换法测定莲子体积，以下列公式计算[6]。

$$V=V_2-V_1$$

式中：V-莲子的体积，mL；V_1-石英砂的体积，mL；V_2-石英砂和莲子的总体积，mL。

收缩率的计算公式如下：

$$S=\frac{V_0-V_t}{V_0}\times 100\%$$

式中：V_0-新鲜莲子的体积；V_t-干燥后莲子的体积，mL。

复水率的测定：称取干燥的莲子样品，于60 ℃蒸馏水中浸泡至饱和状态，称量复水后样品质量，参考文献[3]公式计算复水率。

1.2.3 微观结构

参考文献[7]，对微波真空干燥莲子进行场发射扫描电镜观察，放大倍数为1000倍。

1.2.4 分形分析

参考文献[3]，利用Matlab7.0软件，采用盒计数方法对1.2.3电镜图像进行分形维数计算分析，计算公式如下：

$$\mathrm{FD}=\frac{\log(N_r)}{\log(1/r)} \quad (1)$$

$$\Delta FD=FD_d-FD_0 \quad (2)$$

1.2.5 数据统计分析

所有试验分析重复3次，结果取平均值；采用SAS (version 9.1，SAS Institute，Cary，NC，USA)进行试验设计和数据分析。

2 结果与分析

2.1 莲子微波真空干燥特性

2.1.1 微波强度

由图 1 可知，随干燥时间的延长，莲子含水率呈指数递减趋势。微波强度对莲子干燥时间的影响显著，随微波强度的增大，莲子干燥至平衡含水量所需的时间变短，当微波强度从 5 W/g 增至 20 W/g 时，莲子含水量降至平衡含量水率所需的时间从 32 min 缩减至 11 min。

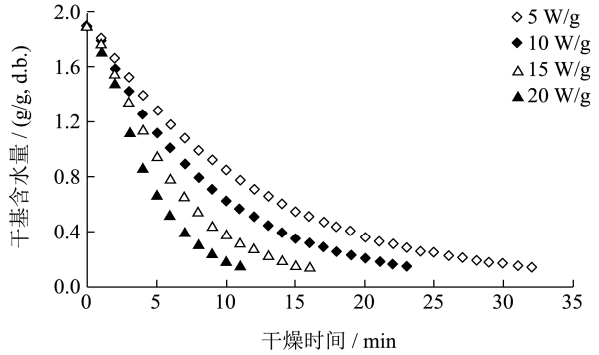


图 1 微波强度对微波真空干燥（−80 kPa）莲子含水率的影响

Fig.1 Effect of power density levels on the moisture content of lotus seeds dried at -80 kPa

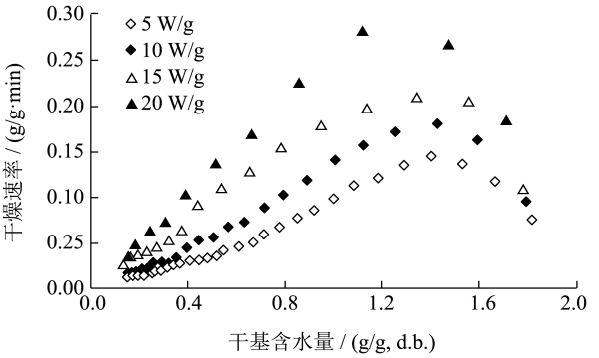


图 2 微波强度对微波真空干燥（真空度：−80 kPa）莲子干燥速率的影响

Fig.2 Effect of power density levels on the drying rates of lotus seeds dried at -80 kPa

由图 2 可知，莲子干燥速率随物料含水率的减小呈现出先增加后下降的趋势，并未发现前人报道的恒速干燥阶段，且以降速干燥阶段为主，这可能是因为微波辐射致使物料内部水分子吸收能量向外迁移，该传质几乎是瞬间完成[3]。同时，微波强度对莲子干燥速率影响显著，相同含水率时，微波强度越大，莲子干燥速率越大。这是因为较高的微波强度可使物料内部吸收更多能量，加大了物料内部与表面的蒸汽压差，致使水分子能更快地达到其沸点[8]。

2.1.2 真空度

由图 3 可知，随着真空度的增加，莲子干燥至平衡含水率所需的时间越短，但效果没有微波强度的影响显著。这是因为物料干燥需使物料达到水沸点的温度并具有水分蒸发所需的潜热，真空度越大，水的沸点降低，干燥速率加快，但是压力下降，水分蒸发潜热增大，干燥速率降低，两者的共同作用导致真空度对含水量的影响不明显[9]。同时，过大的真空度会导致静电的释放。

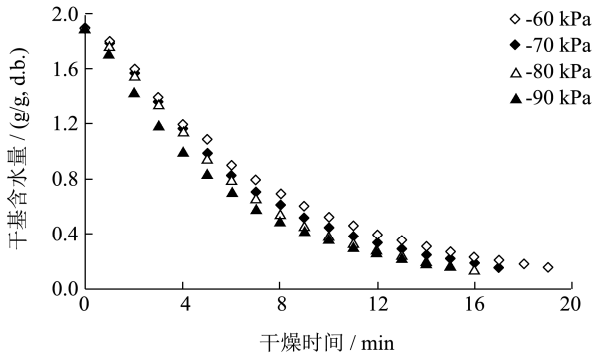


图 3 真空度对微波真空干燥（微波强度:15 W/g）莲子含水率的影响

Fig.3 Effect of vacuum pressure levels on the moisture content of lotus seeds dried at -15 W / g

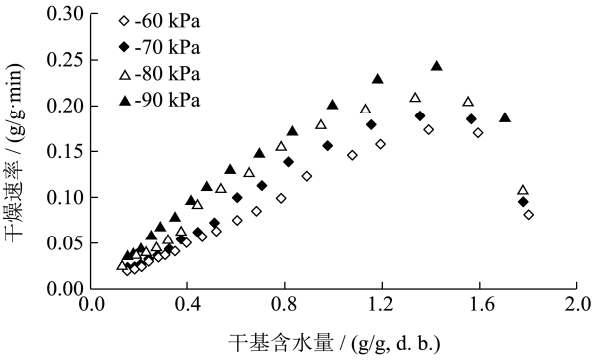


图 4 真空度对对微波真空干燥（微波强度:15 W/g）莲子干燥速率的影响

Fig.4 Effect of vacuum pressure levels on the drying rates of lotus seeds dried at -15 W / g

由图 4 可知，相同含水率下，真空度越大则莲子干燥速率越大，这是因为较高的真空度可使水分蒸发速度加快；真空度较低时，水的沸点较高，物料局部升温较大，致使物料烧焦，阻碍了水分的扩散路径[10]。

2.2 微波真空干燥莲子的宏观物性

2.2.1 波强度对莲子收缩率和复水率的影响

由表 1 可知，微波强度对莲子收缩率和复水率影响显著（$p<0.05$）。当微波强度从 5 W/g 增加到 15 W/g 时，莲子收缩率从 50.9%减小至 47.8%，复水率则从 177.8%增加至 193.0%。这是因为微波强度增加，单位质量和时间内的莲子吸收微波能越多，水分蒸发速度

加快，提高了干燥速率，缩短了物料收缩变形的时间；同时，莲子内部产生的蒸汽压产生膨化效应，内部形成空洞结构，使得收缩率减小，复水率增加[11]。该结论与大蒜[12]和甜菜根[13]研究结果类似。但当微波强度继续增加到 20 W/g 时，收缩率却增加了 10.5%，复水率减少了 8.4%。这是因为微波强度过大，致使物料表面干结，细胞结构严重破坏；另外，干燥温度持续上升导致物料局部温度过热直至烧伤，从而导致收缩率增加，复水率下降[12]。

表 1 不同微波强度对莲子物理特性的影响

Table 1 Effect of different microwave power densities on the physical properties of dried lotus seeds

MVD 参数	物理特性	
	收缩率/%	复水率/%
5 W/g, -80 kPa	50.9±0.36^{b}	177.8±0.13^{c}
10 W/g, -80 kPa	50.5±0.02^{b}	182.6±0.44^{b}
15 W/g, -80 kPa	47.8±0.09^{c}	193.0±0.49^{a}
20 W/g, -80 kPa	52.8±0.21^{a}	176.7±0.25^{c}

注：同一列中，不同的小写字母表示在 $p<0.05$ 水平时具有的显著性水平。

2.2.2 空度对莲子收缩率和复水率的影响

表 2 不同微波强度对莲子物理特性的影响

Table 2 Effect of different microwave power densities on the physical properties of dried lotus seeds

MVD 参数	物理特性	
	收缩率/%	复水率/%
-60 kPa, 15 W/g	51.6±0.32^{a}	178.1±0.52^{c}
-70 kPa, 15 W/g	50.9±0.11^{ab}	179.7±0.05^{c}
-80 kPa, 15 W/g	47.8±0.09^{bc}	193.0±0.49^{a}
-90 kPa, 15 W/g	46.2±0.52^{d}	187.5±0.22^{b}

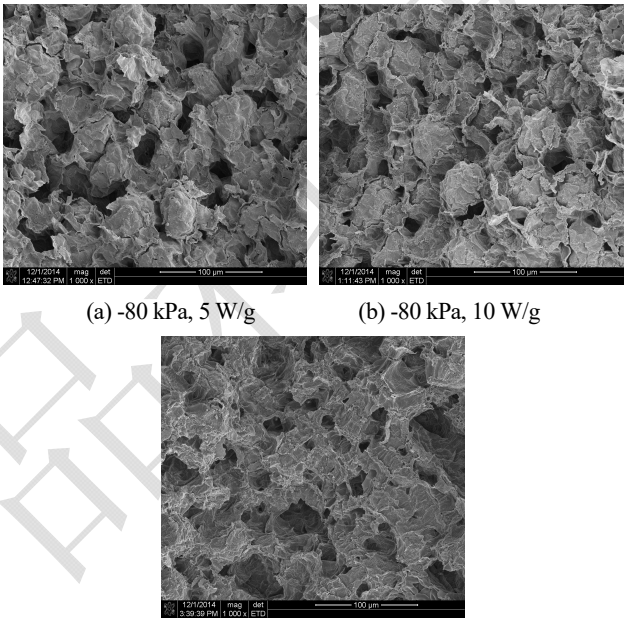
注：同一列中，不同的小写字母表示在 $p<0.05$ 水平时具有的显著性水平。

由表 2 可知，真空度对莲子收缩率和复水率影响显著（$p<0.05$）。在-60 kPa 至-90 kPa 范围内，莲子收缩率随真空度的增加而减小，当真空度为-90 kPa 时，莲子收缩率最小，为 46.2%。真空度变大，水的沸点温度降低易于蒸发，缩短干燥时间；再则，在高真空度环境下，莲子的膨化效应得到了增强，使收缩率变小[2]。对于复水率，随着真空度的增加呈现先增大后降低的趋势。当真空度小于-80 kPa 时，随着真空度的增加，复水率相应增加，这是因为真空度的增加，水分的快速迁移使莲子内部形成疏松的孔隙结构，提高了复水率。当在真空度为-80 kPa 时，复水率达到最大，为 193.0%。然而，当真空度继续增加时，高真空度使莲子内部形成的空穴产生击穿放电现象，导致莲子局部过热而发生不可逆损伤，复水时很难恢复原状，从而降低了复水率[11]。

经过统计学 SAS 软件分析，结果表明微波强度和真空度的交互项对收缩率和复水率的影响显著（数据未列出）。

2.3 微波真空干燥莲子的微观结构

2.3.1 微波真空干燥莲子的微观特性



(a) -80 kPa, 5 W/g (b) -80 kPa, 10 W/g

(c) -80 kPa, 20 W/g

图 5 不同微波真空干燥条件下莲子的场发射扫描电镜的微观图像（放大倍数：1000×）

Fig.5 Field emission scanning electron micrographs of the lotus seeds in different MVD conditions (Magnification: 1000×)

由图 5 和图 6a 可知，不同微波强度和真空度导致莲子微观结构差异明显。当微波强度较低时（5 W/g），莲子内部细胞结构清晰可见，大部分淀粉颗粒仍被包埋在细胞内（图 5a）。当微波强度继续增大时，多数淀粉颗粒开始糊化，并相互融合，其表面还与细胞膜合并[7]，产生孔隙溶洞现象。当微波强度达到 20 W/g，细胞结构受到严重破坏，细胞完全失去形态（图 5c）。而真空度对莲子微观结构的影响正好与微波强度的影响相反，真空度较大时，莲子细胞内部任保留少数完整的淀粉颗粒，但当真空度较小时，莲子淀粉颗粒与部分水分子发生交融，形成中空溶洞空隙结构（图 6a）。

2.3.2 莲子微观结构的分形分析

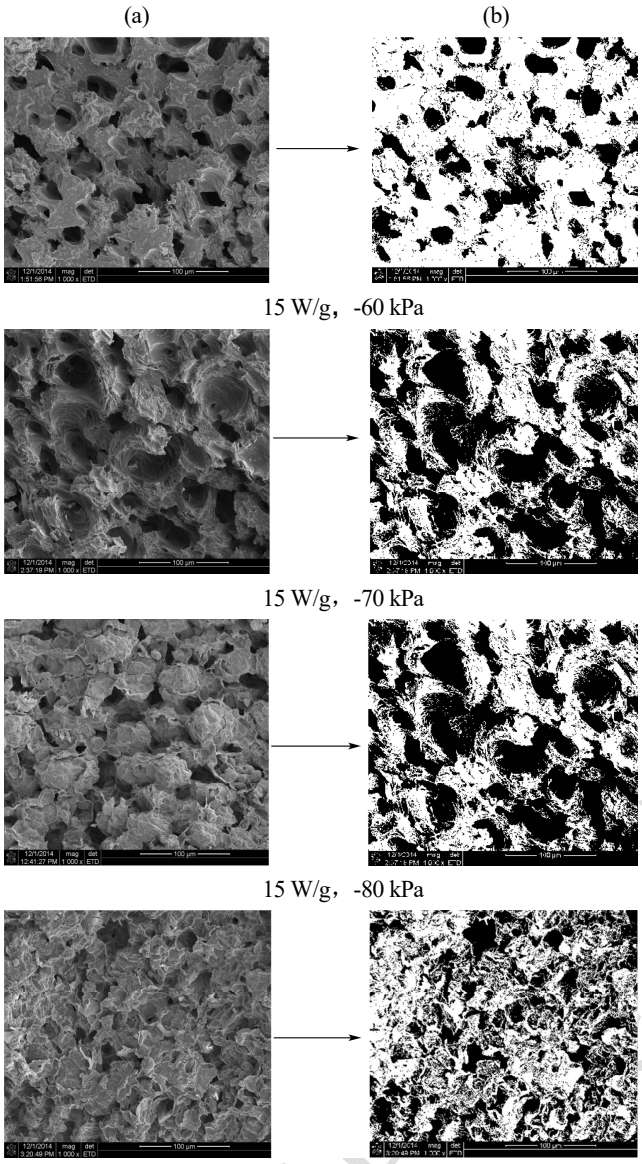


图 6 不同微波真空干燥条件下莲子利用阈值方法得到的微观图像

Fig.6 Microstructure of lotus seeds in different MVD processes using the threshold method

注：(a)原始的场发射扫描电镜图像；(b)二值化图像；放大倍数：1000×。

图 6(a)为微波真空干燥莲子的原始电镜图谱，图 6(b)为其二值化图像，基于灰度分布，可通过计算图像分形维数来定量分析其微观结构[14]。引入新鲜莲子分形维数（1.9823），可进一步得到样品微观结构的分形维数变化值。比如，图 6b 自下而上四幅图对应分形维数变化值分别为 0.01114、0.01195、0.01385 和 0.01624。由此可知，随真空度的减小，莲子内部结构变得越不规则，分形维数变化也就越大[15]。与 2.3.1 的定性描述相比，分形分析能定量描述微波真空干燥莲子的微观结构，通过数字大小分析不同微波真空干燥工艺对莲子微观结构的影响效果。

2.4 莲子微观结构与宏观物性间的关系

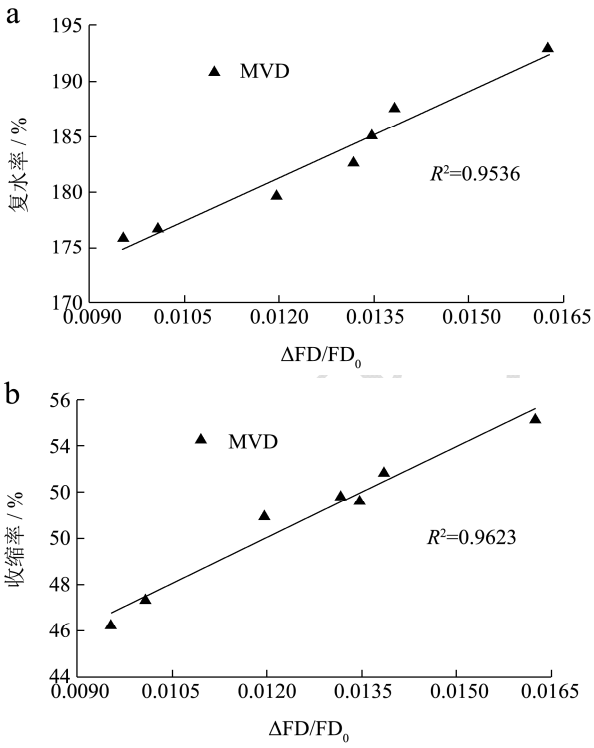


图 7 微波真空干燥莲子物理特性和分形维数间的关系

Fig.7 Relationship between the physical properties and ΔFD/FD$_0$ of lotus seeds dried by MVD: (a) shrinkage; (b) rehydration rate

注：a 代表收缩率，b 代表复水率。

分形维数除可定量描述物料的微观结构，还可建立分形维数与物料宏观物性间的数学关系[3]。由图 7 可知，微波真空干燥莲子微观结构的分形维数越大，其产品的复水率越大，收缩率也越大。同时，其微观结构分形维数与复水率和收缩率间具有良好的线性关系，其相关系数分别达 0.9536 和 0.9623。由此我们可以由莲子微观结构的分形维数来预测其复水率和收索率。在未来研究中，可构建不同干燥方式下莲子干品微观结构的分形维数与更多物性间的关系，由此来鉴别莲子干制品的干燥方式。

3 结论

3.1 微波强度越大或真空度越大，莲子干燥时间和干燥速率就越大。与真空度相比，微波强度对莲子干燥时间和干燥速率影响更显著。

3.2 随着微波强度的增加，莲子收缩率呈现出先减小后增加的趋势，而复水率则呈现出先增加后减少的趋势。莲子收缩率随真空度的增加而减小，复水率则呈现出先增加后减少的趋势。

3.3 微波强度越大或真空度越小，莲子淀粉与水分子交融糊化越明显，形成中空溶洞空隙结构，分形维数变化值越大。

3.4 微波真空干燥莲子微观结构的分形维数越大，其复水率和收缩率就越大，同时分形维数与复水率和收缩率间具有良好的线性关系。

参考文献

[1] Guo Z B, Zeng S X, Lu X, et al. Structural and physicochemical properties of lotus seed starch treated with ultra-high pressure [J]. Food Chemistry, 2015, 186: 223-230

[2] Tian Y T, Zhang Y, Zeng S X, et al. Optimization of microwave vacuum drying of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn) seeds by response surface methodology [J]. Food Science and Technology International, 2012, 18(5): 477-488

[3] Kerdpiboon S, Devahastin S, Kerr W L. Comparative fractal characterization of physical changes of different food products during drying [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(4): 570-580

[4] Reis F R, Lenzi M K, Muniz G I B, et al. Vacuum drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and the effect of process conditions on fractal dimension and rehydration capacity [J]. Drying Technology, 2012, 30(1): 13-19

[5] 徐凤英,陈震,李长友,等.荔枝红外干燥均匀性与果壳孔隙分形色变研究[J].农业机械学报,2014,1:222-227
XU Feng-ying, CHEN Zhen, LI Chang-you. Uniformity of moisture content, shell pore fractal and discoloration of litchi during infrared drying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 1: 222-227

[6] 曾绍校,梁静,郑宝东,等.不同干燥工艺对莲子品质的影响[J].农业工程学报,2007,23:227-231
ZENG Shao-xiao, LIANG Jing, ZHENG Bao-dong, et al. Effects of different drying technology on the quality of lotus-seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engneering, 2007, 23: 227-231

[7] Setiady D, Tang J, Younce F, et al. Porosity, color, texture, and microscopic structure of russet potatoes dried using microwave vacuum, heated air, and freeze drying [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(5): 719-724

[8] Therdthai N, Zhou W B. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha. cordifolia* Opiz. Ex. Fresen.) [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(3): 482-489

[9] 李辉,林河通,袁芳,等.荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J].农业机械学报,2012,6:107-112
LI Hui, LIN He-tong, YUAN Fan, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of litchi pulp [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 6: 107-112

[10] Zhang J, Zhang M, Shan L, et al. Microwave-vacuum heating parameters savory crisp bighead carp (Hypophthalmichthys nobilis) slices [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3): 885-891

[11] Sham P W Y, Scaman C H, Durance T D. Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(9): 1341-1347

[12] Figiel A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1): 98-104

[13] Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(4): 461-470

[14] Niamnuy C, Devahastin S, Soponronnarit S. Some recent advances in microstructural modification and monitoring of foods during drying: A review [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 123: 148-156

[15] Wu Y, Lin Q L, Chen Z X, et al. Fractal analysis of the retrogradation of rice starch by digital image processing [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(1): 182-187