

热风干燥对果蔬薄壁组织细胞结构的影响

常 剑, 杨德勇*, 路倩倩, 刘相东

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究热风干燥过程对果蔬微观结构的影响, 该文选择马铃薯、苹果、胡萝卜 3 种物料, 运用组织石蜡制片、显微成像及图像处理技术, 获得了 3 种物料在热风干燥过程中不同含水率下的薄壁组织细胞结构图像及各细胞结构参数的分布曲线, 并分析了热风干燥对微观结构参数(细胞横截面积、周长、当量直径和圆度)的影响, 建立了微观结构参数与宏观干燥参数(水分比)的拟合方程。结果表明, 各细胞结构参数比与水分比之间具有线性相关性, 可以用数学模型预测在热风干燥过程中苹果、马铃薯和胡萝卜的薄壁组织细胞结构随含水率的变化情况, 研究结果可为控制果蔬在热风干燥条件下的品质及建立干燥过程数学模型提供理论依据。

关键词: 干燥, 微观结构, 水分, 当量直径, 果蔬

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.040

中图分类号: TS255

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-14-0262-07

常 剑, 杨德勇, 路倩倩, 等. 热风干燥对果蔬薄壁组织细胞结构的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 262-268.
Chang Jian, Yang Deyong, Lu Qianqian, et al. Effect of hot-air drying on cell structure of fruit and vegetable parenchyma[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 262-268. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

热风干燥是果蔬常用的脱水方式, 是一个动量、热量、质量耦合传递的过程。由于热质传递梯度的存在和水分的蒸发, 热风干燥会使果蔬组织产生许多物理、化学变化^[1], 其中最主要的物理变化现象就是收缩变形, 而这些宏观上的变化是由微观结构的变化引起的^[2-5]。

果蔬组织由大量的细胞构成, 细胞壁、细胞膜包着细胞内容物构成了单个细胞, 细胞与细胞之间通过中胶层粘结在一起^[6]。在热风干燥过程中, 果蔬组织细胞会收缩进而出现质壁分离(细胞壁与细胞膜包内容物分离的现象), 细胞会破裂进而形成空洞, 这些微观现象在花椰菜、马铃薯、葡萄、苹果等果蔬的对流干燥中均被观察到^[7-10]。这些微观的结构变化会影响质量传递过程的扩散系数, 进而影响干燥过程, 细胞的破裂与分离也会对产品的质构、营养和稳定性有所影响^[11], 所以研究果蔬在干燥过程中微观结构的变化具有重要的应用价值。

显微技术可以用于直观性地观测果蔬组织的细胞结构, 结合图像处理技术也可用于定量地对细胞结构的变化指标进行测定^[12-18]。对于果蔬组织微观结构在干燥过程中的变化已经有了一些研究。Sansanee 等^[19]测定不同干燥条件下胡萝卜的分形维数、细胞直径, 并尝试以

此作为干燥中胡萝卜微观结构变化的指标。Moreira 等^[20]对新鲜的和不同干燥方法处理过的板栗表层细胞进行观测, 测定并分析了 6 种细胞的尺寸和形状参数。Ramos 等^[9]在研究葡萄的对流干燥时, 观察到细胞面积和周长变小但细胞形状保持不变。Bolin 和 Huxsoll^[21]研究了干燥过程中苹果细胞的结构变化, 发现干燥前后样品细胞的圆度存在差异。Lewicki 和 Drzewucka^[22]在苹果立方块对流干燥过程中的研究发现, 细胞大小服从对数正态分布, 干燥过程中水分的损失伴随着细胞的破裂, 破裂程度取决于其含水率。

干燥过程对果蔬组织结构影响的研究已经逐渐深入到细胞结构水平, 对于干燥模型模拟及优化、宏观收缩的预测都有重要的作用。为全面了解不同果蔬组织在热风干燥过程中细胞结构的变化及其与宏观参数的相互关系, 本文选取典型的马铃薯、苹果和胡萝卜 3 种材料的薄壁组织进行试验研究, 通过对干燥前后样品细胞结构的观测和含水率的测定, 选取细胞尺寸参数和形状参数进行分析, 并选择和建立微观参数与宏观参数(水分比)的数学模型, 用来预测热风干燥过程中果蔬薄壁组织细胞结构的变化。

1 材料与方 法

1.1 材 料

将同品种、同批次的市售新鲜马铃薯、苹果和胡萝卜洗净, 分别在表皮以下 5 mm 处取材, 以得到非特异化的薄壁组织, 用锋利刀片切取尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的薄块。将同种物料切块分成 3 组, 其中第 1 组 1 块, 第 2、3 组每组 7 块, 并分别进行编号。第 1 组切块用于新鲜组织石蜡切片制备及观测, 第 2 组

收稿日期: 2011-12-25 修订日期: 2012-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076163, 31171772)

作者简介: 常 剑(1984-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士生, 主要从事农产品干燥理论与技术的研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: 0115-cj@163.com

※通信作者: 杨德勇(1970-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事干燥理论与技术、农产品干燥与储藏研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: ydy@cau.edu.cn

切块用于热风干燥过程中薄壁组织含水率的测定，第 3 组切块用于干燥过程中不同含水率下的薄壁组织石蜡切片制备及观测。

1.2 热风干燥

3 种物料的干燥试验分别进行，试验条件、过程相同。干燥前对第 2 组切块分别称质量，之后将第 2、3 组切块置于玻璃平板上放入烘箱中干燥。物块下底面与玻璃板接触，其余表面均接触热风，热风温度 50℃，风速 0.2 m/s。保持干燥温度不变，每隔 10 min 取出 2 组中编号相同的 2 个切块分别称质量和组织石蜡切片制作，其中第 2 组切块在称质量后立刻放回烘箱中继续干燥前后 2 次称量的质量变化不大于 0.001 g 时即可认为干燥完毕。物料的水分比 X/X_0 由式 (1) 计算得到。

$$\frac{X}{X_0} = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (1)$$

式中， X 为某一时刻干燥样品的干基质量含水率，kg/kg； X_0 为样品干燥前的初始干基质量含水率，kg/kg； m_0 为样品干燥前的初始质量，kg； m_t 为某一时刻干燥样品的质量，kg； m_e 为干燥结束时的样品质量，kg。

1.3 组织石蜡切片制备及显微图像观察

为了在显微镜下更清晰地观察薄壁组织的细胞结构，采用石蜡切片法^[23]将上述 3 种物料的第 1 组新鲜组织切块、第 3 组不同含水率的切块制作成石蜡切片标本，通过正置/透反射金相显微镜 (MIT500) 放大 100 倍进行观察，并利用随机配套的 Motic Images Plus 2.0 显微镜图像分析软件捕捉获得薄壁组织细胞结构的原始图像。

1.4 图像处理及测量

从 3 种物料的原图像中可以分辨出细胞的轮廓，部分细胞中存在淀粉粒。为了便于测量和分析，用 Adobe Photoshop 软件去除图像中细胞内的物质，只留下细胞轮廓的灰色图像，再将灰色图像转变为黑白图像，并调整图片的亮度和对比度，使图像清晰，细胞轮廓明显。

对得到的每张原始图像进行上述图像处理，然后将处理后的黑白图像导入 Motic Images Plus 2.0 软件测量细胞的面积及细胞周长，处于边缘处的细胞不进行测量，自动记录测量结果并以文本格式存储，由式 (2)、(3) 计算细胞的当量直径和圆度^[10]，并对所得数据进行统计分析，由频率分布直方图获得各微观结构参数的分布曲线。

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2)$$

$$S_R = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3)$$

式中： d 为细胞当量直径， μm ； A 为细胞面积， μm^2 ； S_R 为细胞圆度； P 为细胞周长， μm 。

2 结果与分析

2.1 苹果薄壁组织细胞在干燥过程中的微观结构

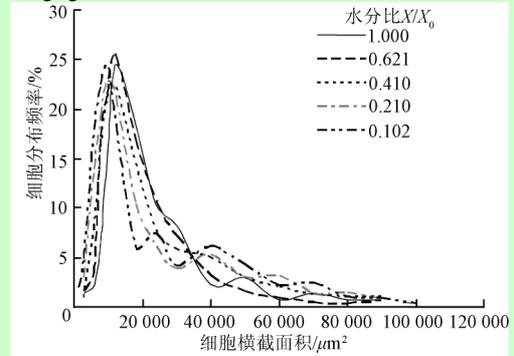
试验中新鲜苹果薄壁组织的初始湿基质量含水率为 86.16%，初始水分比为 1.000，不同干燥时刻所测苹果切块的

水分比如表 1 所示，其结构参数的统计分布规律如图 1 所示。

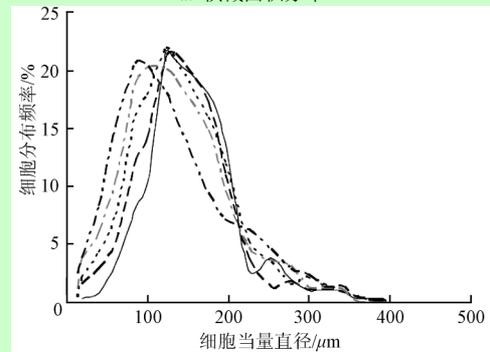
表 1 苹果切块不同干燥时间的水分比
Table 1 Moisture ratio of apple cuts on different drying time

干燥时间/min	0	10	20	30	40	50
水分比 X/X_0	1.000	0.703	0.621	0.410	0.210	0.102

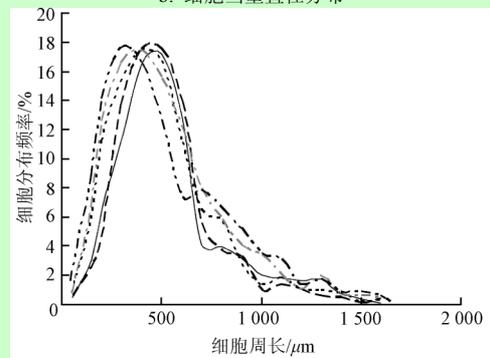
注： X 为某时刻样品干基质量含水率，kg/kg； X_0 为干燥前样品初始干基质量含水率，kg/kg。下同。



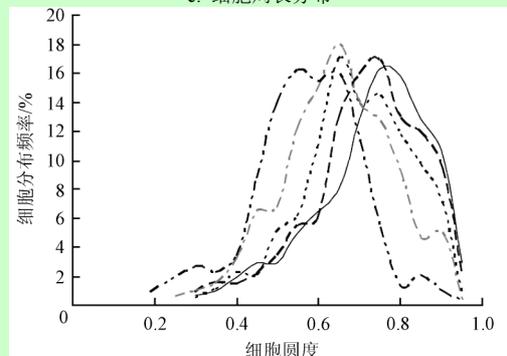
a. 横截面积分布



b. 细胞当量直径分布



c. 细胞周长分布



d. 细胞圆度分布

注： X/X_0 为水分比，下同。

图 1 50℃ 热风干燥中苹果薄壁组织细胞各微观结构参数分布

Fig.1 Cell microstructural parameter distributions of apple parenchyma during 50℃ hot-air drying

由图 1 可知,新鲜苹果细胞 ($X/X_0=1.000$) 面积的主要分布区间在 $40\ 000\ \mu\text{m}^2$ 以下, 峰值为 $11\ 800\ \mu\text{m}^2$; 当量直径分布范围为 $36\sim 376\ \mu\text{m}$, 大部分分布在 $300\ \mu\text{m}$ 以下, 其峰值为 $127\ \mu\text{m}$; 周长分布范围为 $112\sim 1\ 692\ \mu\text{m}$, 大部分分布在 $1\ 200\ \mu\text{m}$ 以下, 其峰值为 $500\ \mu\text{m}$; 圆度近似服从对数正态分布, 峰值是 0.76 , 大部分圆度在 0.6 以上, 因此大部分新鲜苹果细胞可近似为椭圆或 5 边形 (5 边形的圆度为 0.86)。

随着干燥过程的进行, 物料的水分比逐渐减小, 苹果细胞的面积和当量直径随之逐渐减小。当水分比由 0.621 降至 0.102 时, 苹果细胞横截面积分布的规律相似, 但主要分布区间稍有偏移, 在干燥最后阶段, 细胞横截面积小于 $18\ 000\ \mu\text{m}^2$ 的占细胞总量的 54.5% , 在新鲜苹果中占到了 49.5% , 说明细胞在干燥过程中逐渐收缩变小。新鲜苹果中细胞横截面积大于 $40\ 000\ \mu\text{m}^2$ 的占细胞总量的 11.4% , 干燥后则占到了 23.7% , 这可能是在干燥过程中发生了细胞破裂, 多个相邻细胞结合使大细胞轮廓数量增加。

苹果细胞当量直径在干燥结束时的分布范围为 $25.7\sim 386\ \mu\text{m}$, 当量直径分布的峰值在 $85\ \mu\text{m}$ 处, 细胞当量直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的占 41.5% , 而新鲜苹果中仅占 19.4% ; 细胞当量直径大于 $225\ \mu\text{m}$ 的细胞数量在新鲜苹果中占 9.4% , 而干燥后占到 12.1% 。

干燥初期, 苹果细胞周长的变化并不明显, 其分布范围为 $70\sim 1\ 600\ \mu\text{m}$, 峰值为 $500\ \mu\text{m}$ 。但干燥到水分比为 0.102 时, 细胞周长分布的峰值变为 $300\ \mu\text{m}$ 。

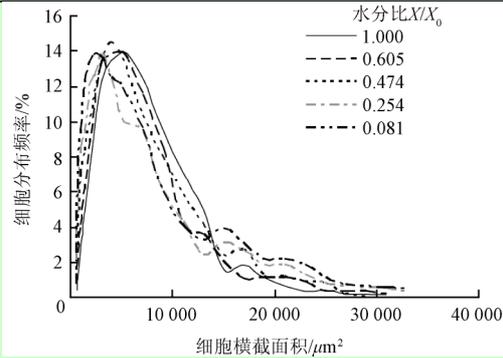
干燥最后阶段, 苹果细胞的圆度的分布在 $0.19\sim 0.95$ 之间, 圆度分布的峰值从新鲜时的 0.80 降至约 0.55 , 新鲜苹果中圆度小于 0.5 的细胞占到细胞总量的 13.5% , 干燥后则占到了 31.5% 。这表明, 苹果组织在热风干燥过程中, 显微结构发生了很大变化, 细胞呈现不规则的形状。细胞的收缩、细胞壁的折叠以及细胞从圆形变成为长形和其他不规则形状, 都是细胞形状参数改变的原因^[24]。

2.2 马铃薯薄壁组织细胞在干燥过程中的微观结构

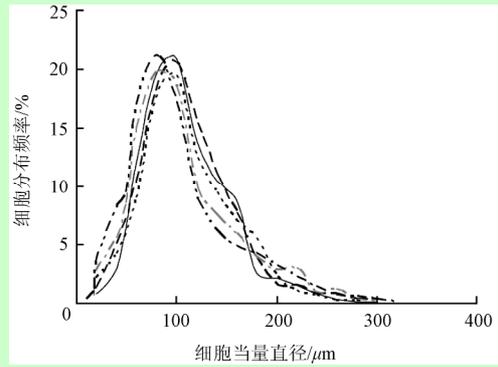
试验用新鲜马铃薯薄壁组织的初始湿基含水率为 82.52% 。不同干燥时刻所测马铃薯切块的水分比如表 2 所示, 其结构参数的统计分布规律如图 2 所示。

表 2 马铃薯切块不同干燥时间的水分比

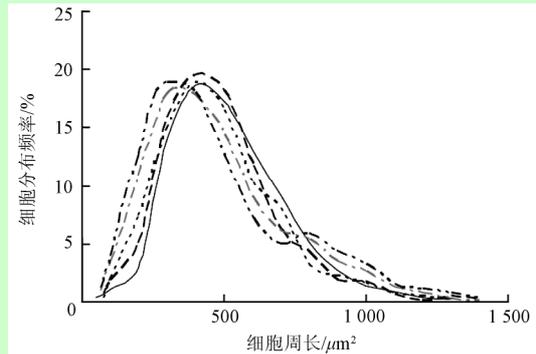
干燥时间/min	0	10	20	30	40	50
水分比 X/X_0	1.000	0.687	0.605	0.474	0.254	0.081



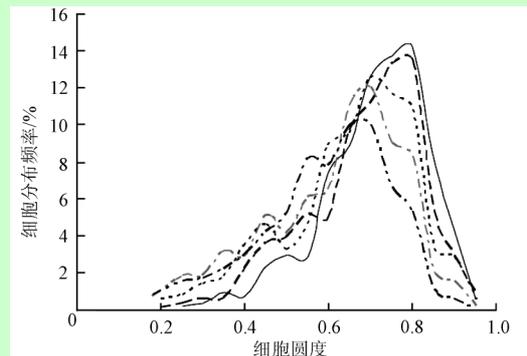
a. 细胞横截面积分布



b. 细胞当量直径分布



c. 细胞周长分布



d. 细胞圆度分布

图 2 50℃热风干燥马铃薯薄壁组织细胞各微观结构参数分布
Fig.2 Cell microstructural parameter distributions of potato parenchyma during 50℃ hot-air drying

图 2 为热风干燥过程中不同水分比条件下马铃薯薄壁组织细胞面积、当量直径、周长和圆度的统计分布规律。由图可知,新鲜马铃薯细胞 ($X/X_0=1.000$) 横截面积分布曲线的峰值出现在 $5\ 100\ \mu\text{m}^2$, 其分布区间范围较苹果的窄; 当量直径分布范围为 $24\sim 300\ \mu\text{m}$, 大部分分布在 $200\ \mu\text{m}$ 以下, 其峰值为 $97\ \mu\text{m}$; 周长的分布范围为 $107\sim 1\ 289\ \mu\text{m}$, 大部分分布在 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 以下, 周长的峰值为 $400\ \mu\text{m}$; 圆度分布的峰值是 0.79 , 大部分圆度也在 0.6 以上, 细胞也可近似为椭圆或 5 边形。

水分比为 0.605 时, 马铃薯细胞横截面积的峰值为 $5\ 000\ \mu\text{m}^2$, 水分比为 0.081 时, 峰值降为 $2\ 300\ \mu\text{m}^2$, 且横截面积小于 $10\ 000\ \mu\text{m}^2$ 的细胞占细胞总量的 69.6% , 而新鲜马铃薯中占到了 67.1% , 说明马铃薯细胞在热风干燥过程中有收缩, 但收缩程度比苹果细胞的小; 新鲜马铃

薯中横截面积大于 $17\ 000\ \mu\text{m}^2$ 的细胞占 5.5%，干燥后占 7.0%，大细胞比例略有增加，说明在热风干燥过程中有少数马铃薯细胞破裂形成了大的细胞轮廓。

干燥结束时，马铃薯细胞当量直径的分布范围为 $22.3\sim 330\ \mu\text{m}$ ，峰值为 $80\ \mu\text{m}$ ，而新鲜薄壁组织细胞的峰值为 $97\ \mu\text{m}$ ；新鲜马铃薯中细胞当量直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的细胞占 52.2%，而干燥后的占比升至 62.4%；新鲜马铃薯中细胞当量直径大于 $200\ \mu\text{m}$ 的占 3.7%，而干燥后的所占比例达到 6.0%。

马铃薯细胞周长的变化趋势与苹果细胞周长的变化趋势大致相同，但与苹果组织细胞相比其变化幅度更小。水分比为 0.605 时，细胞周长的分布范围为 $90\sim 1\ 400\ \mu\text{m}$ ，峰值为 $400\ \mu\text{m}$ 。随着干燥过程的进行，细胞周长的分布变化不显著，水分比为 0.081 时，细胞周长的分布范围为 $75\sim 1\ 400\ \mu\text{m}$ ，峰值为 $340\ \mu\text{m}$ 。

干燥后期，马铃薯细胞的圆度分布在 0.18~0.95 间，分布曲线的峰值为 0.67，圆度小于 0.5 的新鲜马铃薯细胞所占比例小于 15%，而干燥后则占约 29%，表明马铃薯细胞在热风干燥过程中变得不规则。

2.3 胡萝卜薄壁组织细胞在干燥过程中的微观结构

试验用新鲜胡萝卜薄壁组织的初始湿基含水率为 89.90%。不同干燥时刻所测胡萝卜切块的水分比如表 3 所示，其结构参数的统计分布规律如图 3 所示。

表 3 胡萝卜切块不同干燥时间的水分比

Table 3 Moisture ratio of carrot cuts on different drying time

干燥时间/min	0	10	20	30	40	50
水分比 X/X_0	1.000	0.742	0.631	0.389	0.146	0.104

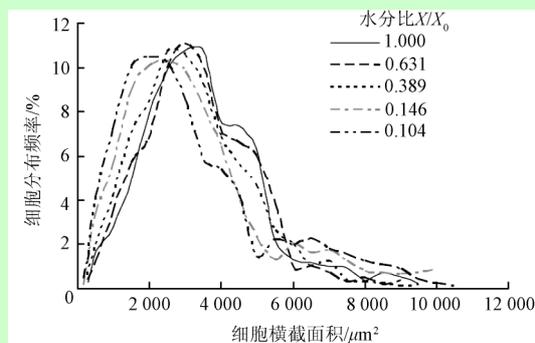
图 3 为干燥过程中胡萝卜薄壁组织细胞结构参数的分布变化规律。由图可知，新鲜胡萝卜细胞横截面积分布曲线的峰值出现在 $3\ 300\ \mu\text{m}^2$ ，且大部分细胞的横截面积都小于 $6\ 000\ \mu\text{m}^2$ ，在 3 种物料中分布区间范围最窄；当量直径分布范围为 $27\sim 200\ \mu\text{m}$ ，大部分分布在 $120\ \mu\text{m}$ 以下，当量直径分布峰值为 $75\ \mu\text{m}$ ；周长近似服从正态分布，周长分布范围为 $97\sim 800\ \mu\text{m}$ ，大部分小于 $500\ \mu\text{m}$ ，周长分布峰值是 $300\ \mu\text{m}$ ；圆度分布的峰值为 0.81，大部分细胞也可近似为椭圆或 5 边形。

干燥过程中胡萝卜细胞横截面积和当量直径的分布曲线出现整体偏移，横截面积小于 $2\ 500\ \mu\text{m}^2$ 的细胞数量所占比例由干燥前的 33.4% 上升至干燥后的 50.2%，当量直径小于 $50\ \mu\text{m}$ 的细胞则由干燥前的 23.2% 上升至干燥后的 36%，说明大部分胡萝卜细胞在干燥过程中发生了收缩。水分比由 0.631 降至 0.104 时，横截面积峰值由 $3\ 000\ \mu\text{m}^2$ 减小至 $2\ 000\ \mu\text{m}^2$ ，细胞当量直径由 $70\ \mu\text{m}$ 减小至 $60\ \mu\text{m}$ ，进一步说明干燥过程中胡萝卜细胞发生了收缩，但收缩程度没有苹果和马铃薯细胞的大。干燥前后，细胞横截面积大于 $5\ 500\ \mu\text{m}^2$ 的数量由 8.4% 增至 14.9%，当量直径大于 $120\ \mu\text{m}$ 的细胞由 8.5% 增至 12.6%，说明干燥过程中胡萝卜细胞出现破裂导致多个细胞结合，造成大细胞所占比例增大，但大细胞增加的比例没有细胞收缩变化的比例大。

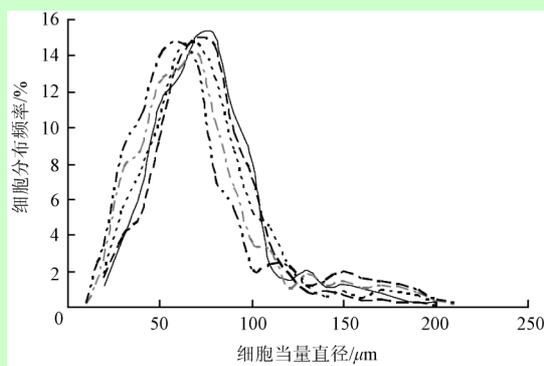
细胞周长在整个干燥过程中的变化不明显，分布曲线的整体轮廓没有发生明显变化。水分比由 0.631 减小至 0.104 时，周长峰值由 $300\ \mu\text{m}$ 减小至 $250\ \mu\text{m}$ 。

干燥前后，胡萝卜细胞圆度的峰值由 0.83 降至 0.75，圆度小于 0.5 的细胞数量由 8.7% 增至 15.5%。干燥后胡萝卜细胞的圆度主要分布在 0.60~0.80 之间。

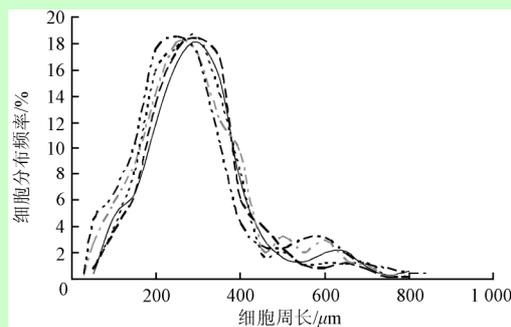
通过对热风干燥过程中上述 3 种果蔬组织细胞图像变化和微观参数变化的分析可知，图像分析和微观参数分析得到的结果是一致的，即干燥过程对 3 种果蔬物料细胞微观结构的整体影响趋势相同。随着干燥过程的进行，组织细胞整体收缩变形，各参数值变小；干燥后期，细胞的破裂导致多细胞的结合，使细胞参数值的分布范围变宽。但干燥过程对 3 种果蔬微观结构变化的影响程度不同，仅就当量直径来看，热风干燥对苹果细胞的影响最大，干燥前后苹果细胞当量直径峰值降低了 $42\ \mu\text{m}$ ，对马铃薯细胞的影响较小，对胡萝卜细胞的影响程度最小，干燥前后胡萝卜细胞当量直径峰值仅降低了 $15\ \mu\text{m}$ 。



a. 细胞横截面积分布



b. 细胞当量直径分布



c. 细胞周长分布

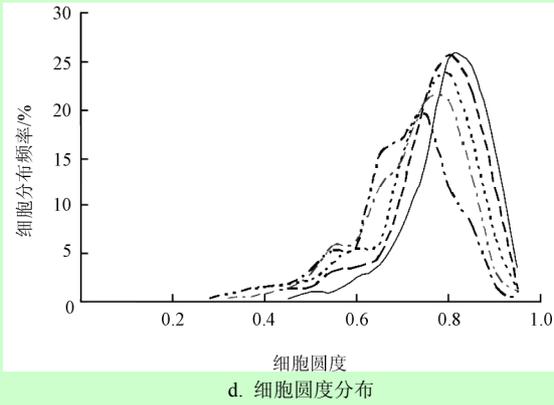


图 3 50°C 热风干燥胡萝卜薄壁组织细胞各微观结构参数分布
Fig.3 Cell microstructural parameter distributions of carrot parenchyma during 50°C hot-air drying

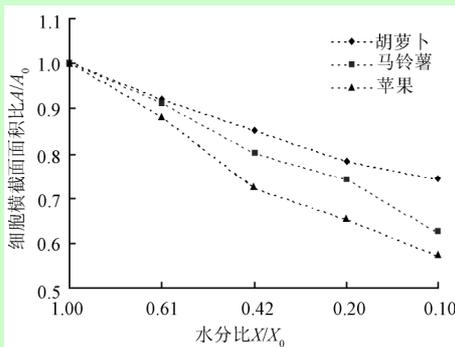
2.4 干燥过程中宏观参数与微观参数的关系

热风干燥过程中，不同水分比条件下上述 3 种果蔬的细胞横截面积、周长、当量直径和圆度 4 个微观结构参数的变化不尽相同。为了揭示微观结构参数与宏观含水率的关系，将每种物料在不同水分比时测定的细胞各参数均值与干燥初始均值做比，研究 A/A_0 (面积比)、 P/P_0 (周长比)、 d/d_0 (当量直径比)、 S_R/S_{R0} (圆度比) 随 X/X_0 (水分比) 的变化规律，由此得到各参数均值比与水分比的关系，见图 8。

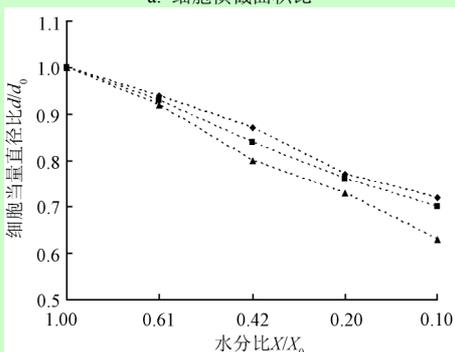
从图 4 可以看出，各参数均值比与水分比服从线性关系。为了使方程简单易用，采用线性关系式表示

$$Y = aM + b \quad (4)$$

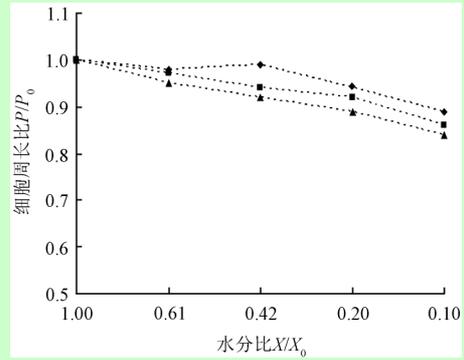
式中， Y 为细胞结构参数均值之比 (A/A_0 、 P/P_0 、 d/d_0 、 S_R/S_{R0} ，下标“0”表示各参数干燥前的初始均值)； M 为水分比； a 、 b 为系数，不同的果蔬种类及选择不同的微观参数，其值均不同，由图 4 中的数据对每条趋势线进行线性拟合，得到 3 种物料在不同微观参数下的 a 、 b 值，见表 4。



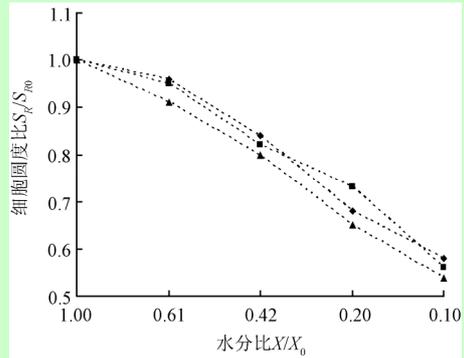
a. 细胞横截面积比



b. 细胞当量直径比



c. 细胞周长比



d. 细胞圆度比

图 4 50°C 热风干燥中不同水分比的薄壁组织细胞微观结构参数均值比

Fig.4 Average ratio of cell microstructural parameters of parenchyma under different moisture ratio during 50°C hot-air drying

表 4 3 种物料在各微观参数下拟合系数、决定系数及标准偏差
Table 4 Values of fitting coefficients, correlation coefficients and standard deviations of three materials under different microstructural parameters

种类	参数均值比	a	b	R^2	Std
苹果	A/A_0	0.4800	0.5403	0.9703	0.33
	P/P_0	0.1644	0.8434	0.9193	0.14
	d/d_0	0.3997	0.6298	0.9423	0.38
	S_R/S_{R0}	0.5026	0.5458	0.9238	0.06
马铃薯	A/A_0	0.3988	0.6282	0.9361	0.38
	P/P_0	0.1384	0.8735	0.9006	0.18
	d/d_0	0.3334	0.6907	0.9573	0.28
	S_R/S_{R0}	0.4496	0.5910	0.9066	0.07
胡萝卜	A/A_0	0.2907	0.7225	0.9831	0.18
	P/P_0	0.0649	0.9397	0.9011	0.39
	d/d_0	0.3140	0.7137	0.9397	0.34
	S_R/S_{R0}	0.4565	0.5953	0.9018	0.08

注： A/A_0 、 P/P_0 、 d/d_0 、 S_R/S_{R0} 分别为细胞的面积比、周长比、当量直径比和圆度比， a 、 b 为拟合参数， R^2 为决定系数， Std 为标准偏差。

由表 4 可知， Y 与 M 的决定系数均在 0.9 以上，表明热风干燥过程中苹果、马铃薯和胡萝卜薄壁组织细胞的微观结构参数随含水率的减少而线性减小。由表中 a 值来看，干燥对 3 种物料薄壁组织细胞大小、形状的影响程度是不同的，苹果细胞的变化幅度均大于其他 2 种物料，胡萝卜各参数变化幅度最小，这说明较小的细胞在干燥过程中更不容易发生收缩和变形，能够承受一定的

干燥强度,而在相同干燥条件下大细胞受到的影响比小细胞要大。由表中的 R^2 值来看,苹果、胡萝卜的细胞横截面积与含水率的拟合最好,建立热风干燥过程宏微观关系式时可选择细胞横截面积作为微观结构参数的代表,而马铃薯组织则选择细胞当量直径较为合适。

3 结 论

本文选定细胞横截面积、当量直径、周长和圆度 4 种微观结构参数,分别对马铃薯、苹果和胡萝卜 3 种果蔬材料在热风干燥时薄壁组织细胞结构的变化进行了研究,得出如下结论:

1) 新鲜的苹果、马铃薯、胡萝卜细胞饱满,形状均接近圆形,但细胞横截面积、周长、当量直径存在较大差异:苹果细胞最大,其当量直径峰值为 $127\ \mu\text{m}$,胡萝卜细胞最小,其当量直径峰值为 $75\ \mu\text{m}$,马铃薯细胞介于二者之间;在热风干燥过程中,大细胞受到的影响比小细胞大,苹果细胞的变化程度最大,胡萝卜细胞的变化最小。

2) 在热风干燥过程中,3 种物料微观结构参数与干燥过程宏观参数线性相关,决定系数均在 0.9 以上。苹果、马铃薯和胡萝卜细胞的横截面积、当量直径、周长和圆度均随含水率的减少而线性减小,且建立热风干燥过程宏微观关系式时宜选择细胞面积作为苹果、胡萝卜薄壁组织微观结构参数的代表,马铃薯薄壁组织选择细胞当量直径较为合适。拟合得到的数学模型可用于预测热风干燥过程中苹果、马铃薯和胡萝卜细胞结构参数随含水率的变化情况,有助于干燥过程果蔬内部品质的控制以及果蔬组织干燥过程数学模型的建立。

[参 考 文 献]

- [1] Lewicki P P. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review[J]. *International Journal of Food Properties*, 1998, 1(1): 1—22.
- [2] Mayor L, Moreira R, Sereno A M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin fruits[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(1): 29—37.
- [3] Ramirez C, Troncoso E, Munoz J, et al. Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 106(3): 253—261.
- [4] Mayor L, Pissarra J, Sereno A M. Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(3): 326—339.
- [5] 张京平, 彭争, 邵珍华. 果蔬边界收缩方程的探讨[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 141—143.
Zhang Jingping, Peng Zheng, Shao Zhenhua. Preliminary study on the shrinkage equation of boundary of spherical fruit and vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(6): 141—143. (in Chinese with English abstract)
- [6] Mujumdar A S. *Handbook of industrial drying*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006: 666—669.
- [7] Garcia-Perez J V, Ortuno C, Puig A, et al. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 7(8): 1—10.
- [8] Troncoso E, Pedreschi F. Modeling of textural changes during drying of potato slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(4): 577—584.
- [9] Ramos I N, Silva C L M, Sereno A M, et al. Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62(2): 159—164.
- [10] Lewicki P P, Pawlak G. Effect of drying on microstructure of plant tissue[J]. *Drying Technology*, 2003, 21(4): 657—683.
- [11] Aguilera J M. Why food microstructure[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 67(1/2): 3—11.
- [12] 朱继英, 王相友, 王娟. 气调贮藏对双孢蘑菇细胞超微结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 78—81.
Zhu Jiying, Wang Xiangyou, Wang Juan. Effects of CA storage on ultrastructure of *Agaricus bisporus*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(1): 78—81. (in Chinese with English abstract)
- [13] 任亚梅, 刘兴华, 徐春雅, 等. 不同处理对猕猴桃采后生理和细胞超微结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 217—221.
Ren Yamei, Liu Xinghua, Xu Chunya, et al. Effects of different treatments on the post-harvest physiology and cell ultrastructure of kiwifruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(7): 217—221. (in Chinese with English abstract)
- [14] Ong S P, Law C L. Microstructure and optical properties of salak fruit under different drying and pretreatment conditions[J]. *Drying technology*, 2011, 29(16): 1954—1962.
- [15] Moreno J, Simpson R, Baeza A, et al. Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmodehydration kinetics and microstructure of strawberries[J]. *LWT-Food Science and Technologies*, 2012, 45(2): 148—154.
- [16] 文颖强, 冯嘉玥, 任小林. 热空气处理对延长梨枣果实冷藏保鲜期的机理研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 24—28.
Wen Yingqiang, Feng Jiayue, Ren Xiaolin. Mechanism for prolonging cold storage life of Li jubei fruit by heat air treatment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(12): 24—28. (in Chinese with English abstract)
- [17] 林河通, 陈莲, 孔祥佳, 等. 包装对龙眼果实贮藏期间果皮失水褐变和细胞超微结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 237—240.
Lin Hetong, Chen Lian, Kong Xiangjia, et al. Effects of packaging on desiccation-induced browning and cellular ultrastructure of pericarp of longan fruits during storage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(12): 237—240. (in Chinese with English abstract)
- [18] Nieto A B, Salvatori D M, Castro M A, et al. Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: Shrinkage, porosity, density and microscopic features[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(2): 269—278.

- [19] Sansanee S, Sakamon D, Somchart S. Generalized microstructural change and structure quality indicators of a food product undergoing different drying methods and conditions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(1): 148—154.
- [20] Moreira R, Chenlo F, Chaguri L, et al. Analysis of chestnut cellular tissue during osmotic dehydration, air drying, and rehydration processes[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(1): 10—18.
- [21] Bolin H R, Huxsoll C C. Scanning electron microscope/image analyzer determination of dimensional postharvest changes in fruit cells[J]. *Journal of Food Science*, 1987, 52(6): 1649—1650.
- [22] Lewicki P P, Drzewucka J. Effect of drying on tissue structure of selected fruits and vegetables[C]// Akritidis C B, Marinos-Kouris D, Saravacos G D. *Proceedings of the 11th International Drying Symposium Drying' 98*. Thessaloniki, 1998, B: 1093—1099.
- [23] 杨捷频. 常规石蜡切片方法的改良[J]. *生物学杂志*, 2006, 23(1): 45—46.
Yang Jiepin. Improvement of traditional paraffin section preparation methods[J]. *Journal of Biology*, 2006, 23(1): 45—46. (in Chinese with English abstract)
- [24] Mayor L, Silva M A, Sereno A M. Microstructural changes during drying of apple slices[J]. *Drying Technology*, 2005, 23(9/11): 2261—2276.

Effect of hot-air drying on cell structure of fruit and vegetable parenchyma

Chang Jian, Yang Deyong^{*}, Lu Qianqian², Liu Xiangdong
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Potato, apple and carrot were chosen to study the effect of hot-air drying on their microstructure. By using the paraffin technology, the micro-imaging technology and the image processing technology, the microstructure images under different moisture content during drying were obtained, and the effects of hot-air drying on the parameters, in terms of cell area, cell perimeter, cell equivalent diameter and cell roundness were analyzed from the cell parameters distribution curves under different moisture content. Fitting equations were built to describe the positive correlation between the cell parameter ratios and the moisture ratio during the hot-air drying. The results indicated that the cell changing with moisture content during drying could be predicted by the fitting equations. This study provided a theoretical basis for the quality control and the mathematical model of fruits and vegetables during hot-air drying.

Key words: drying, microstructure, moisture, equivalent diameter, fruit and vegetable