

中文摘要

目前,腊肉生产存在很多问题,阻碍了腊肉进一步发展。作为腊肉生产中非常关键的工序,烘烤中存在的问题也最为严重,如表皮结痂,水分不易通过表皮蒸发出去;产品外硬内软,影响产品质量;烘烤效率低下,浪费能源等。

为解决腊肉烘烤中存在的问题,本文首先研究了猪通脊肉脱水动力学、吸附等温线特性以及脱水后体积变化规律;应用前人研究其他物料总结出来的模型,拟合了猪通脊肉的干燥曲线和吸附等温线。在此理论基础之上,根据猪通脊肉脱水特征,对腊肉烘烤工序进行了改进,不仅达到了烘烤的要求,而且产品色泽、质地和口感都有明显提高。

研究表明,猪通脊肉脱水为单一降率干燥过程,完全受内部水分迁移控制;温度是影响干燥速率的主要因素,扩散系数是温度的函数;风速是影响体积收缩的主要因素,体积收缩系数与水分含量线性相关;改良 Henderson-Pabis 模型 $MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$ 为干燥曲线的最优模型,而 Henderson 模型 $A_w = 1 - \exp(-ATM^B)$ 对等温线的拟合程度最高。最后提出了三段式腊肉烘烤工艺:(1) 预热:温度 40℃、相对湿度 $\geq 90\%$ 、2h;(2) 高温低湿:温度 70℃、相对湿度 40%, 30min;(3) 低温高湿:温度 40℃、相对湿度 60%、17h。所获得的腊肉终产品微生物安全水分含量为 25%~35%。

关键词: 腊肉, 烘烤, 猪通脊, 脱水动力学, 吸附等温线, 脱水模型

Abstract

There are presently many problems in the production of Chinese bacon, slowing its further development. Toasting, as the most important procedure of the production, encountered with the most serious problem, including the coat scabbed with the moisture difficult to evaporate, the hard outer of product and the soft inside, and the low efficiency of toasting energy.

To solve those problems, dehydration kinetics, moisture sorption isotherms and the volumetric shrinkage of pork tenderloin were researched in this study. Applying the models, concluded by the former scholars, after their experimenting with other materials, the drying curves and the sorption isotherms of pork tenderloin was simulated. Then, the toasting procedure of Chinese bacon production was improved on the base of this theoretics, according to the dehydration characteristics, with the satisfied results.

It was found that there is no period of constant drying rate in the dehydration process of pork tenderloin with the dehydration completely controlled by internal mass transfer; air temperature was the most important factor affected drying rate, the effective diffusivity coefficients was a function of air temperature; the volumetric shrinkage of the sample was affected mainly by air velocity, whilst effect of air temperature was negligible, moreover, the relationships between the shrinkage factor and moisture content appeared linear. Modified Henderson and Pabis model, expressed as $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$, best described the dehydration behaviour. The Henderson model was the best fit to moisture sorption isotherms, and the Henderson equations are suitable for representing the relationship between water activity and equilibrium moisture content. At last, 3-stages toasting procedure was proposed, embodied as follows: (1) Pre-heating: 40°C, $\geq 90\%$ RH, 2h; (2) High temperature and low humidity: 70°C, 40%RH, 30min; (3) Low temperature and high humidity: 40°C, 60%RH, 15h. The microbial safety moisture content of Chinese bacon could be recommended the range of 25%-35%.

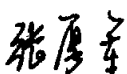
Key words: Chinese bacon, toasting, pork tenderloin, dehydration kinetics, moisture sorption isotherms, dehydration model

基本符号

a, b, c	干燥模型的常量
g, h, n	水分活度
A_w	干燥模型系数
k, k_0, k_1	扩散系数 (m^2/h)
D_c	扩散频率 (m^2/h)
D_0	活化能 (kg/mol)
E_a	水分含量 (kg 水/ kg 干物质)
M	平衡水分
M_e	起始水分含量
M_0	水分含量比
MR	试验观测次数
N	气体常数 ($kJ/mol \cdot k$)
R	体积收缩系数
S	空气温度 ($^{\circ}C$)
T	干燥时间 (h)
t	空气风速 (m/s)
V	干基水分含量
X	常量数
z	

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

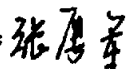
研究生签名：

时间：2006 年 6 月 21 日


关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：

时间：2006 年 6 月 21 日

导师签名：

时间：2006年6月21日

第一章 引言

1.1 研究目的和意义

脱水过程在制备腊肉、腊肠以及火腿等中国传统肉制品中都有广泛的应用。目前,由于缺乏具体的理论指导,我国传统肉制品实际生产过程的脱水工序,尤其是腊肉制品的烘烤程序,不符合传质原理,表面常常结痂,阻碍了产品内部水分扩散至表面。这样,一方面导致表皮干裂,降低干制产品质量;另一方面烘烤效率低,操作时间长,增加了产品的成本。食品脱水是一个复杂的传热传质过程,在干燥过程中,食品的物理性质、化学性质和营养成分等变化都与温度、水分和时间有关。因此如果能够准确地预测脱水过程中食品内部的水分分布以及温度变化,就可以根据物料的特殊性质合理选择较佳工艺;根据所提出最优脱水模型,预测不同条件下的脱水过程。

过去三十年,国内外关于脱水干燥的研究主要集中于粮食、水果和蔬菜,在干燥理论方面取得了巨大进展,同时也已经形成了一套比较成熟的研究方法。但是,关于肉品干燥脱水时的水分迁移的研究则鲜有报道。

因此,系统地研究肉制品干燥动力学、吸附等温线以及脱水后体积收缩具有十分重要的意义,能够为改善脱水工艺提供理论依据。

1.2 基础理论

1.2.1 肉中水分的相关概述

水分在肉中占有绝大部分,可以把肉看做是一个复杂的胶体分散体系。水为溶媒,其他成分为溶质以不同形式分散在溶媒中。水在肉体内分布是不均匀的,其中肌肉含水量为70%~80%,皮肤为60%~70%,骨骼为12%~15%。肉中水分含量多少及存在状态影响肉的加工质量及贮藏性。水分含量与肉品储藏特性呈函数关系,水分多易遭致细菌、霉菌繁殖,引起肉的腐败变质;肉的脱水干缩不仅使肉品失重而且影响肉的颜色、风味和组织状态,并引起脂肪氧化。

1.2.1.1 肉中水分的存在形式^[1]

核磁共振的研究表明,肉中的水分并非像纯水那样以游离的状态存在,其存在的形式大致可以分为三种。

(1) 结合水 是指与蛋白质分子表面借助极性基团的静电引力紧密接合的水分子层,它的冰点很低(-40℃),无溶剂特性,不易受肌肉蛋白质结构和电荷变化的影响,甚至在施加严重外力条件下,也不能改变其与蛋白质分子紧密结合的状态。结合水约占肌肉总水分的5%。

(2) 不易流动水 肌肉中大部分水分(80%)是以不易流动水状态存在于纤丝、肌原纤维及肌膜之间。它能溶解盐及其他物质,并在0℃或稍低时结冰。这部分水的量取决于肌原纤维蛋白质凝胶的网状结构变化,通常我们度量的肌肉系水力及其变化主要指这部分水。

(3) 自由水 指存在于细胞外间隙中能自由流动的水, 约占总水分的15%。

干燥脱水只能脱去自由水以及部分不易流动水。

1.2.1.2 水分活度

水分是微生物生长活动所必须的物质, 一般来说, 食品的水分含量越高, 越易腐败。但是, 严格地说微生物生长并不取决于食品的水分总含量, 而是它的有效水分, 即微生物能利用的水分多少, 通常用水分活度来衡量。

所谓水分活度 (A_w) 是指食品在密闭容器内测得的水蒸气压力 (p) 与同温下测得的纯水蒸气压力 (p_0) 之比。

$$\text{即: } A_w = p / p_0 \quad (1-1)$$

根据拉乌耳定律, 在一定温度下, 稀溶液的蒸汽压等于纯溶剂的蒸汽压乘以该溶剂在溶液中的摩尔分数。

$$\text{即: } p = p_0 \times \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (1-2)$$

式中 n_1 ——溶质的摩尔数;

n_2 ——溶剂的摩尔数。

由式 (1-1)、(1-2) 得

$$A_w = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (1-3)$$

纯水的 $A_w=1$, 在完全不含水时 $A_w=0$, 所以 A_w 的范围在 0~1。水分活度反映了水分与肉品结合的强弱及被微生物利用的有效性, 各种食品都有一定的 A_w 值。新鲜肉为 0.97~0.98, 鱼为 0.98~0.99, 红肠为 0.96 左右, 干肠为 0.65~0.85。各种微生物的生长发育有最适的 A_w 值。一般而言, 细菌生长的 A_w 下限为 0.94, 酵母菌为 0.88, 霉菌为 0.8。 A_w 下降至 0.7 以下, 大多数微生物不能生长发育, 但嗜盐菌在 0.7、耐干燥霉菌在 0.65、耐渗透压的酵母菌在 0.61 时仍能发育。近年来被称为“中间水分食品”(Intermediate moisture food) 的一类制品其 A_w 在 0.65~0.85, 在这一领域内, 细菌相对来说不易繁殖, 但是霉菌仍能生长且脂肪易发生自动氧化。^[2]

1.2.2 干燥动力学

当湿物料受热干燥时, 虽然开始时水分均匀分布于物料中, 但是由于物料水分的汽化是在表面进行, 故会逐渐形成从物料内部到表面的湿度梯度。从而物料内部的水分就以此湿度梯度为推动力, 逐渐向表面转移。但是, 物料内部水分的扩散推动力不只是湿度梯度, 温度梯度也可以使物料内部发生传递, 称为热湿导。水分分布均匀的物料, 当温度分布不均时, 水分将从温度高处向低处转移。所以热湿导的方向是由高温向低温进行。对于热风干燥和一般辐射干燥, 物料内部的温度梯度与湿度梯度方向相反; 对于接触干燥和采用微波加热的干燥, 两种梯度方向一致。

水分从肉品表面扩散到环境中去的能力取决于肉品的水分含量以及组成成分。同时，环境温度、相对湿度、边界层性质对扩散的影响也很重要。水分由物料内部扩散至表面以后，便在表面汽化，并向气相中传递。可以认为，在表面附近存在一层气膜，此层内的水蒸气分压等于物料中水分的蒸气压。显然，此蒸汽压的大小主要取决于物料中水分的结合方式。水分在外部气相中传递的推动力即为此膜内的蒸汽分压与气相主体中蒸汽分压之差。造成这种蒸汽分压差（推动力）的原因，对热风干燥来说是干燥介质的流动不断带走汽化的蒸汽，对真空干燥来说是真空泵的抽吸带走汽化的蒸汽。

水分的内部扩散和外部扩散是同时进行的。虽然如此，但在不同干燥过程的不同时期，控制干燥速率机理不一定相同，这是由于物料的结构、性质、温度及气相的情况的影响所致。因此干燥机理是非常复杂的。水分的内部扩散速率与表面汽化速率近于相等的场合是少见的。实际上，在干燥过程中，某些物料水分表面汽化的速率小于内部扩散速率，而另一些物料，则水分表面汽化速率大于内部扩散速率。显然，速率较慢的是控制过程的关键。前一种情形称为表面汽化控制，后一种称为内部扩散控制。

1.2.2.1 干燥曲线^[3]

由间歇操作实验所得数据，以时间 t 对干基含水量 X 作图，得到如图 1-1 所示的物料湿含量 X 随时间的变化曲线，称为干燥曲线。

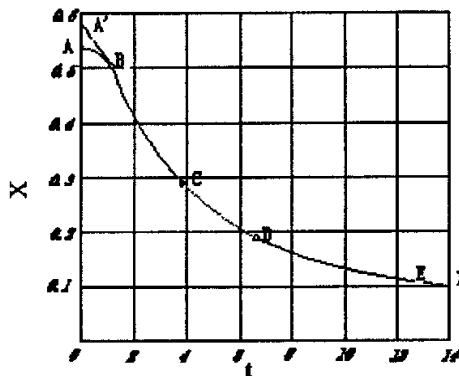


图 1-1 干燥曲线
Fig1-1 Drying curves

AB (或 A'B) 段：A 点代表时间为零时的情况，AB 为湿物料不稳定的加热过程。一般该过程的时间很短，在分析干燥过程中常可忽略，将其作为恒速干燥的一部分。

BC 段：在 BC 段内干燥速率保持恒定，称为恒速干燥阶段。在该阶段：湿物料表面温度为空气的湿球温度 t_w ；物料表面气膜的空气湿度为 t_w 下的饱和湿度 H_w ；干燥速度主要决定于干燥介质的性质和空气与湿物料的接触方式。

C 点：由恒速阶段转为降速阶段的点称为临界点，所对应湿物料的含水量称为临界含水量，用 X_c 表示。临界含水量与湿物料的性质及干燥条件有关。

CDE 段：随着物料含水量的减少，干燥速率下降，CDE 段称为降速干燥阶段。干燥速率主要取决于水分在物料内部的迁移速率；不同类型物料结构不同，降速阶段速率曲线的形状也不同。

E 点: E 点的干燥速率为零, X^* 即为操作条件下的平衡含水量。

需要指出的是,干燥曲线或干燥速率曲线是在恒定的空气条件下获得的,对指定的物料,空气的温度、湿度不同,速率曲线的位置也不同。

1.2.2.2 干燥速率曲线

干燥速率表达了脱水的快慢程度。将干燥速率对物料含水量作图得到的曲线,称为干燥速率曲线。横座标为干基含水量 X ,纵座标为干燥速率 R ,即单位时间内在单位面积上汽化的水分质量,其表达式为:

$$R = -\frac{M}{A} \frac{dX}{dt} \quad (1-4)$$

由于影响干燥的因素很多,所以物料干燥速度与含水量的关系必须通过具体的实验来测定。干燥速度实验的原始数据,首先反映物料含水量与干燥时间的关系。对于热风干燥,影响干燥速度的因素很多:

- (1) 湿物料的性质与形状:包括物理结构、化学组成、形状大小和水分结合方式;
- (2) 物料的含水量:物料中水分活度与含水量有关,因而影响干燥速度;
- (3) 物料的温度:物料温度与物料中水分的蒸汽压有关,并且也与水分的扩散系数有关,一般温度愈高,则干燥速度愈大;
- (4) 干燥介质的温度:干燥介质的温度直接影响干燥过程的传热推动力,介质温度愈高,干燥速度愈大,以不损坏被干燥物料的品质为原则;
- (5) 干燥介质的湿度:相对湿度愈低,水分汽化愈快,在干燥初期,影响尤为显著;
- (6) 干燥介质的流速:介质的流动速度影响干燥过程的对流传热和对流传质,一般介质速度愈大,干燥速度愈大,特别是在干燥初期;
- (7) 介质与物料的接触状况:主要是指流动方向。流动方向与物料汽化表面垂直时,干燥速度最快,平时时最差。凡是对介质流动造成较强烈的湍动,因而使气-固边界层变薄的因素,均可提高干燥速度。

1.2.3 吸附等温线^[2]

在恒温条件下,以食品的含水量(用每单位干物质质量中水的质量表示)对水活性绘图形成的曲线,称为水分吸附等温线(moisture sorption isotherm,MSI)。水分吸附等温线对于了解以下信息是十分有意义的:①在浓缩和干燥过程中样品脱水的难易程度与相对蒸汽压的关系;②配制混合食品必须避免水分在配料之间的转移;③测定包装材料的阻湿性;④测定什么样的水分含量能够抑制微生物的生长;⑤预测食品的化学和物理稳定性与水分的关系。

等温线形状和位置与试样的组成、物理结构(如结晶或无定形)、预处理、温度和制作方法等因素相关。

虽然等温线划分为3个区间,但还不能确定区间的分界线,而且除结合水外,等温线每一个区间内和区间与区间之间的水都能发生转换。另外,向干燥物质中增加水虽然能够稍微改变原来所含水的性质,即基质的溶胀和溶解过程。但是当等温线的区间II增加水时,区间I水的性质几乎保持不变。同样,在区间III内增加水,区间II的性质也几乎保持不变。从而可以说明,食品

中结合得最不牢固的那部分水对食品的稳定起着重要作用。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 干燥动力学研究

干燥是工业上贮藏粮食、水果和蔬菜的常用方法。因此一直以来对谷物、水果和蔬菜的干燥动力学研究较多,也形成了一套比较成熟的理论。生鲜肉从古至今多以盐渍或低温等控制微生物的活动来达到贮藏的目的,肉制品的干燥动力学理论几乎一片空白。

干燥食品(全干或半干食品)因其运输方便、不易腐败变质、所需贮存空间小,在全球范围内越来越受重视。食品的干燥是失水和升温过程,在干燥过程中,食品内传热和传质过程同时进行。在实际生产过程中,常优化干燥工艺以防止食品收缩过快而产生挠曲变形,提高干后品质。

至今有许多学者认为,食品内部的水分运动是受扩散机理控制的。但究竟是以液态形式扩散,还是以气态形式扩散,则还未确定。干燥过程中可能两种形式并存,或某一种形式为主。Whitake曾经指出,仅有水分扩散方程不能充分描述谷物内部的水分扩散过程,这是因为水分的吸收和蒸发引起了热量的变化,热量扩散通过物料时又引起了温度的变化,从而影响了物料吸收和蒸发水分的能力。^[4]

自然干燥虽然简单、节能,但是往往需要庞大面积,而且易受到虫害及微生物的污染,不利于工业标准化生产。为了更好地利用干燥脱水贮藏水果、蔬菜等高水分含量农产品,学者们针对大量水果、蔬菜的干燥过程进行了深入系统的研究,而且还总结出了各自的干燥模型:葡萄^[5]、杏^[6]、海枣^[7-8]、青椒、绿豆和南瓜^[9]、蓝桉树^[10-11]、薄荷、马鞭草和红根草^[10]、梨^[12]和梨皮^[13]、猕猴桃^[14]。

水分在基质内的迁移本身就是一个非常复杂的过程,包括水分和水汽在固体基质中的扩散。固体食品中的扩散机制包括:分子扩散、毛细管流动、努森分子流动、水压力流动以及固体表面扩散。^[15]再加上农产品内部结构各向异性、非均一,产品形状不规则,而且干燥过程中体积收缩,形状发生变化^[16-17],使得水分扩散更复杂,而肉中的水分扩散比一般农产品还要复杂^[18]。因此,分析、模拟肉中的水分扩散现象是建立在一系列的假设基础之上的。假设条件虽然因模型需要而有所不同,但是在模拟时都是从费克第二定律——非稳态扩散出发的,所以不管模型如何,费克第二定律所作的假设都是前提条件:①干燥开始阶段,固体基质的水分均匀分布;②干燥过程中,扩散系数保持不变;④扩散在一个面上进行,即一维扩散;⑤表面传热传质阻力忽略不计。

洪新华和李保国将稻谷颗粒视为圆柱体,利用费克第二定律,建立了稻谷干燥过程中水分扩散模型,分析了稻谷干燥特性和介质温度与含水率对扩散系数的影响,并进行了薄层干燥试验。他们的研究表明:稻谷干燥过程中水分比呈指数曲线变化,风湿越高,曲线越陡;稻谷在干燥的初始和最后阶段,水分比对水分扩散系数影响较大。^[19]

W.A.M.McMinn和T.R.A.Magee(1996)^[15]研究了圆柱体马铃薯水分迁移动力学。他们应用费克非稳态扩散模型发现:干燥过程是内部扩散控制的单一降率干燥阶段;温度为干燥速率主要影响因素,风速影响不大;风速对体积收缩的影响较大,相对于风速,温度的影响可忽略不计。

1.3.2 吸附等温线的相关研究

吸附等温线的试验数据一般都符合某些现有公式, 这些公式称为吸湿模型。所用模型都建立在一定的理论基础之上, 例如, 动力学、毛细管收缩、水势以及极化作用等理论。如果仅仅依靠一种理论而建立的模型很难预测整个水分活度范围内的吸附等温线, 如 Langmuri、BET、Halsey 和 Bradley 等。所以, 有些人结合考虑上述理论提出了下列模型: Hailwood-Horrobin 和 Smith 模型; 半经验模型 Hendersson; 经验模型 Oswin, Mujica-Mujica 等 (J.Comaposada et al., 2000)。^[20]

Motarjemi (1988)^[21]提出 Bradley 公式适合于描述肌球蛋白、卵蛋白等蛋白质的吸湿等温线。建立在单分子层吸收理论基础之上的 BET 公式常用于描述吸附等温线。而 GAB 模型被认为是拟合许多食品原料吸附等温线最好的公式之一; 水分活度高达 0.94 时, GAB 模型仍能很好地进行预测。Henderson 公式能较好地描述球状蛋白吸附等温线^[22]Ferro Fontan 等 (1982)^[23]研究了胶原蛋白和鱼肉蛋白浓缩物的吸附等温线, 并用 Hailwood-Horrobin 对此进行了模拟。

M.Kouhila 等 (2002)^[24]研究了摩洛哥蓝桉树的吸附等温线, 他们指出, 试验数据与 GAB 模型吻合得非常好。

N.Wang 和 J.G.Brennan (1991)^[25]研究了马铃薯四个温度下的吸附等温线性质。指出 GAB 和 Oswin 公式适合表达水分活度在 0—88% 内的马铃薯平衡水分含量与水分活度间的关系。

Lomauro 等^[26]以 163 种食品原料为研究对象, 分别对 3 个两参数模型和 1 个三参数模型进行了评测。GAB 模型被认为是最通用的模型, 适用用许多种原料。^[27-29]BET 模型因其热动力学基础而成为了最通俗的模型, Dincen 和 Esin^[30]对 BET 模型修正后描述通心面的吸附等温线。Oswin 公式^[31]能够拟合 S 形等温吸附线。Smith^[32]公式适用于生物原料的吸附等温线, 如淀粉和纤维。

1.3.3 脱水后体积收缩的相关研究

由于食品物料各向异性、非均一, 故脱水时收缩不均匀, 物料形状会发生改变。体积收缩有双重重要性: 首先, 影响产品质构和其他质量因子; 其次, 模拟脱水时物料内部传质过程需要这方面资料。

Arnosti、Freire和Sartori (2000)^[33]报道了梨、胡萝卜、马铃薯、甜马铃薯和大蒜脱水时表观密度与水分含量线性相关。

Ramallo等 (2001)^[34]报道, “yerba maté” 的收缩系数及表观密度与水分含量线性相关, 与温度无关。

Otoniel Corzo 等 (2004)^[35]研究了不同含水量的沙丁鱼片渗透脱水时体积收缩的情况, 发现体积收缩因子与水分含量线性相关; 收缩体积与失水体积也线性相关。

Kilpatrick、Lowe 和 Van Arsdel (1975)^[36]研究了马铃薯和其他一些蔬菜在干燥过程中体积收缩。

Charm (1978)^[37]研究了肉和马铃薯的体积收缩现象。

Lozano、Rotstein 和 Urbicain (1980)^[38]报道了苹果组织不同水分含量时的体积收缩以及孔隙度的变化。

水果渗透脱水时，其体积收缩取决于食品失水和溶质的增加。^[39]

1.4 研究内容

烘烤是腊肉制备工艺中至关重要的一道工序。烘烤伴随着传热传质过程，即水分迁移和热量传递。目前，腊肉烘烤工艺存在严重弊端，效率低下，产品表皮结痂，外硬内软等。早期腊肉原料肉为五花肉，随着人们生活质量的提高，后来出现了后腿肉腊肉，甚至纯瘦肉腊肉。为了便于研究脱水动力学理论，我们选择猪通脊肉为研究对象，因为其内部组成接近于后腿肉，而且比一般瘦肉更均匀。样品取为近似无限长圆柱体，水分扩散简化为半径方向上的一维扩散，这样所有半径方向上扩散情况相同。

本试验将测定恒定相对空气湿度，不同温度、不同风速下，样品水分含量以及体积随时间的变化关系；测定不同温度，不同湿度下肉样的平衡水分含量；最后，在以上理论上提出一套完善的烘烤工艺。

具体包括以下三个方面的内容：

1. 研究猪通脊肉脱水时水分迁移动力学；
2. 改进传统腊肉生产过程中的烘烤工艺；
3. 研究猪通脊肉吸附等温线；
4. 研究猪通脊肉脱水时体积收缩及内部水分分布。

第二章 猪通脊肉脱水时水分迁移动力学

前言

干燥为一种工业贮藏手段,水果或蔬菜在热风干燥过程中,其含水量或水分活度降低,从而减少产品生化、化学和微生物腐败。^[40]严格意义上讲,干燥过程主要包括四种传递现象:内部和外部传热,内部和外部传质。农产品干燥的主要目的是将水分含量降至一定水平,达到长期贮藏的目的。而且,干燥极大降低了产品的重量和体积,降低了包装、贮藏和运输费用。^[41-42]为了更好地控制不同条件下的干燥过程,需要建立精确的干燥曲线模型。

在肉制品的生产中,成熟过程是很重要的一步。在此阶段,通过脱水降低水分活度,增加产品稳定性;产品内部发生一些物理、微生物和生化反应,形成特征外形、特征风味或香味。^[43-44]这些动力学反应受水分含量影响,反应进程受脱水速率影响。

鼓风干燥被普遍认为是一种常规的食品干燥技术。绝大多数食品干燥过程都是降率干燥阶段,产品连续干燥时,表面常常结痂,阻碍食品内部水分扩散至表面,从而导致表皮干裂,降低干制产品质量。^[45-46]这种不良现象会使水分扩散机制复杂化,水分状态改变,水分分布急剧变化以及产品内部形成的小孔结构分布不均,极大地降低了产品质量。所以,必须依据一个完善的数学模型来确定最适的干燥程序,使干燥快速高效进行,提高干制品品质。

本研究以圆柱体通脊肉样(19mm×70mm)为研究对象,测定不同温度、不同风速下样品的干燥曲线以及脱水速率曲线。研究温度、风速对热风干燥猪通脊肉的影响,计算水分扩散系数和扩散活化能;分析、评价十种模型对干燥曲线的模拟效果,找出最适合猪通脊肉的干燥模型。

2.1 材料与方法

2.1.1 试验原料

新鲜猪通脊肉（购自北京超市发超市），圆柱体样品： $\phi 19\text{mm} \times 70\text{mm}$ 。

2.1.2 脱水设备

如图 2-1 所示，在不锈钢圆形风管顶端固定一个 SUNON DP200A 型轴流风机（ $\phi 120\text{mm} \times 308\text{mm}$ ），将其置于 DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱内。样品用网孔为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 不锈钢丝网固定于风管内。风速用调速器和 QDF-5D 型热球式电风速计进行调节和控制。

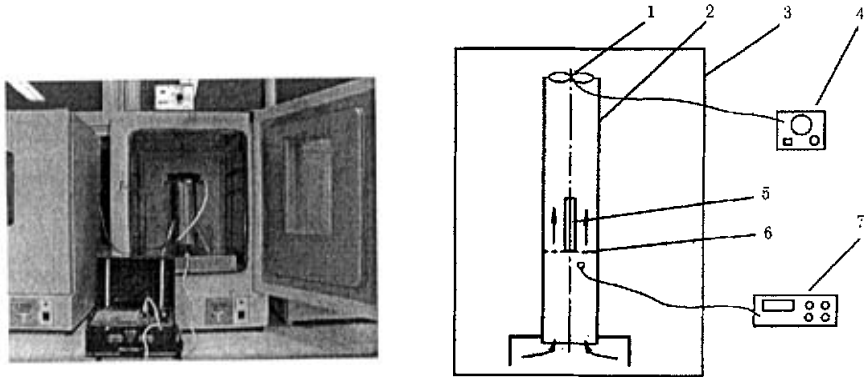


图 2-1 干燥试验装置图

Fig2-1 Schematic drawing of the apparatus used for the drying test

1-轴流风机 2-风管 3-电热恒温鼓风干燥箱 4-调速器 5-样品 6-样品固定架 7-热球式电风速计

2.1.3 试验仪器

DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱	上海精密实验设备有限公司
SUNON DP200A 型风扇	北京神通电器厂
D60-2F 型电动搅拌机调速器	杭州仪表电机厂
QDF-5D 型热球式电风速计	北京环境保护仪器厂
MP502B 型电子天平	上海精密实验设备有限公司

2.1.4 试验方法

用氰基丙烯酸乙酯在样品两端面粘上铝箔，以避免水分从端面扩散到环境中去，从而保证在脱水过程中水分只在半径方向上发生迁移，即一维扩散。脱水时汽化表面为圆柱体侧面，为了确保肉样表面扩散的气流环境相同，试验过程中保持样品的轴线始终与风向平行。

试验过程中，每隔 1h 取出样品快速称重，立即放回干燥箱继续脱水。直到连续两次重量差

小于 0.1g 时，认为样品水分含量在此干燥条件下达到平衡 (M_e)。按 GB9695.15-88 方法测定平衡水分含量。每次试验做三次平行。

目前，大多数肉制品都属于低温肉制品，加工温度一般在 80℃ 以下。而一般腊肉制作时，烘烤温度为 50℃~60℃，风速为 1m/s~2.5m/s。所以，在本章中，试验因子、水平设计如下表：

表 2-1 试验因子、水平表
Table 2-1 Factors and levels of the experiments

试验号	温度℃	风速 (m/s)
1	40	1.0
2	40	1.5
3	40	2.0
4	50	2.0
5	60	2.0

2.1.5 数据分析

数据统计分析采用 SPSS12.0 完成；

图形、图像处理采用 Origin6.0、Excell2000 完成。

2.2 结果与分析

2.2.1 干燥曲线

水分含量比值 (MR) 与时间的关系随温度、风速的变化如图 2-1、图 2-2 所示。

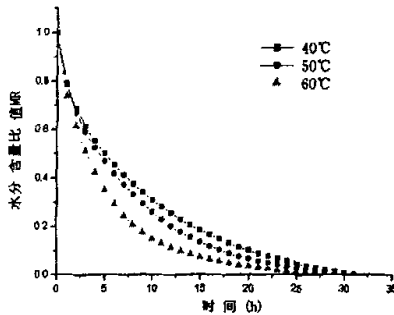


图 2-2 风速为 2m/s，温度分别为 40℃、50℃、60℃ 的干燥曲线

Fig2-2 Variation of moisture ratio with drying time at 2m/s of drying air

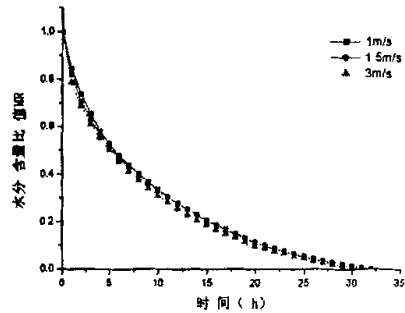


图 2-3 温度为 40℃，风速分别为 1.0m/s、1.5m/s、2m/s 的干燥曲线

Fig2-3 Variation of moisture ratio with drying time at 40℃ of drying air

从图 2-2、图 2-3 可知，温度越高，水分含量比值 MR 下降越快，风速越大 MR 下降越快；而且，水分含量随温度的变化明显大于随风速的变化。这表明，在试验所选择的温度、风速范围内，温度是干燥的主要影响因素，风速影响不大。Henderson 和 Pabis (1961) [47] 报道，当空气湍流

动时, 气流速度对干燥速率没有影响。风速对干燥速率没有明显影响说明表面扩散阻力相对于内部传质阻力可以忽略不计。符合牛顿第二定律的假设条件。

Yusheng 和 Poulsen (1988)^[48]、Wang 和 Brennan (1992)^[49]也得出风速对于干燥速率的影响很小。此外, Mulet 等(1987)^[50]和 Rossello 等(1992)^[51]提出风速对于干燥速率的影响存在一个临界值, 当风速大于此临界值时, 表面阻力可以忽略不计。

而 İnci Türk Toğrul 和 Dursun Pehlivan (2003)^[18]以杏为研究对象时, 发现温度为 50℃~80℃、风速为 0.2m/s~1.5m/s 时, 水分含量随风速变化比随温度的变化明显。风速对水分含量影响大小取决于物料表面水分向空气中扩散的能力以及气流与物料表面边界层的厚度, 因为增加空气流速, 会降低物料表面水蒸气薄膜的厚度, 从而增加传热传质速率。^[52]

2.2.2 干燥曲线模拟

表 2-2 是一些学者在研究粮食、水果和蔬菜干燥动力学时建立的数学模型。分别用这十种模型模拟猪通脊肉干燥曲线, 采用最小二乘法作非线性回归 (SPSS 统计软件), 比较模拟结果, 选择最优模型。回归系数的平方 (R^2) 作为评价模型拟合程度的最基本指标。 R^2 越大说明模型能更好解释变量的变异性。此外, chi-square (χ^2), 平均偏差 (MBE), 均方差 (RMSE) 也可以作为拟合指标, 这三项越小说明拟合越好, 越能反映实际情况。

用十种干燥模型分别模拟试验数据, SPSS 软件运行得到的各模型特征参数见表 2-3。表 2-4 列出了模型对 5 次试验模拟后所得的回归系数的平方 R^2 , chi-square χ^2 , 平均偏差 MBE, 均方差 RMSE 的平均值。

表 2-2 干燥曲线模型

Table2-2 Mathematical models given by various authors for the drying curves

Model no.	Model equation	Name	References
1	$MR=\exp(-kt)$	Newton	Liu and Bakker-Arkema (1997) ^[53]
2	$MR=\exp(-kt^n)$	Page	Zhang and Litchfield (1991) ^[54]
3	$MR=\exp(-kt)^n$	改良 Page	White,Ross and Ponelert (1981) ^[55]
4	$MR=a\exp(-kt)$	Henderson - Pabis	Chhninman (1984) ^[56]
5	$MR=a\exp(-kt)+c$	Logarithmic	Togrul and Pehlivan (2002) ^[57]
6	$MR=a\exp(-k_0t)+b\exp(-k_1t)$	Two-term	Rahman andTheband (1998) ^[58]
7	$MR=1+at+bt^2$	Wang - Singh	Wang and Singh (1978) ^[59]
8	$MR= a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$	Approximation of diffusion	Yaldiz et al. (2001) ^[60]
9	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-gt)+c\exp(-ht)$	改良 Henderson -Pabis	Karathanos (1999) ^[61]
10	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$	Two-term exponential	Sharaf-Elden et al. (1980) ^[62]

表中 $MR= (M - M_e) / (M_0 - M_e)$

表 2-3 不同温度、风速下干燥模型的参数值

Table2-3 Parameter values for all models of drying curves at different temperature and velocity

模型	参数	温度 (°C)			风速 (m/s)		
		40	50	60	1.0	1.5	2.0
Newton	K	0.1241	0.1438	0.2038	0.1147	0.1165	0.1241
Page	K	0.1800	0.1921	0.2757	0.1449	0.1648	0.1800
	N	0.8418	0.8692	0.8364	0.9029	0.8558	0.8418
Modified Page	K	0.1304	0.1498	0.2143	0.1177	0.1216	0.1304
	N	0.8418	0.8692	0.8364	0.9029	0.8558	0.8418
Henderson-Pabis	K	0.1128	0.1335	0.1901	0.1083	0.1069	0.1128
	A	0.9123	0.9305	0.9368	0.9456	0.9209	0.9123
Logarithmic	K	0.1079	0.1306	0.2022	0.1004	0.1012	0.1079
	A	0.9184	0.9328	0.9330	0.9577	0.9286	0.9184
	C	-0.0131	-0.0061	0.0151	-0.0241	-0.0165	-0.0131
Two-term	K ₀	2.4784	2.1081	1.4730	1.3756	1.4750	2.4788
	A	0.1422	0.1260	0.01650	0.0978	0.1378	0.1422
	K ₁	0.1061	0.1256	0.1700	0.1035	0.1003	0.1061
	B	0.8579	0.8742	0.8343	0.9030	0.8631	0.8579
Wang-Singh	A	-0.0829	-0.0897	-0.1069	-0.0793	-0.0789	-0.0829
	B	0.0017	0.0020	0.0027	0.0016	0.0016	0.0017
Approximation of diffusion	A	-18.7406	-19.9368	0.8345	-14.4739	-9.9343	-14.6142
	B	1.0000	1.0000	8.7125	1.0000	1.0000	1.0000
	K	0.1241	0.1438	0.1701	0.1147	0.1165	0.1241
改良 Henderson - Pabis	A	-0.0184	0.4958	0.2983	0.3298	0.1377	0.1422
	B	0.8185	0.3784	0.6022	0.3298	0.2315	0.2656
	C	0.1995	0.1260	0.0994	0.2860	0.6316	0.5924
	K	-0.0334	0.1256	0.3037	0.1083	1.4752	2.4789
	G	0.0893	0.1256	0.1484	0.1083	0.1003	0.1061
	H	1.2261	2.1082	19.2758	0.1083	0.1003	0.1061
Two-term exponential	A	0.1350	0.1247	0.1869	0.0986	0.1325	0.1350
	K	0.8008	1.0154	0.9006	1.0504	0.7669	0.8008

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (2-1)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i}) \quad (2-2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (2-3)$$

式中

$MR_{exp,i}$ 为第 i 个试验值计算得到的水分比

$MR_{pre,i}$ 为第 i 个理论值计算得到的水分比

由表 2-3 知，模型 9 回归所得的 R^2 值最大， x^2 、RMSE 以及 MBE 值最小，拟合程度最高，最逼近实际情况。即：改良 Henderson-Pabis 模型比其他模型能够更好地预测和描述猪通脊肉的干燥特性。Two-term 模型效果次之，最差的是 Wang-Singh 模型。图 2-4、图 2-5 反映了该模型拟合试验数据的效果，各试验点均分布在直线 $y=x$ 附近，尤其图 2-4 中试验点几乎落在直线上，说明试验所得数据几乎跟模型预测值相等，即改良 Henderson-Pabis 模型能够较好地描述风速一定时，不同温度下，猪通脊肉的干燥曲线。

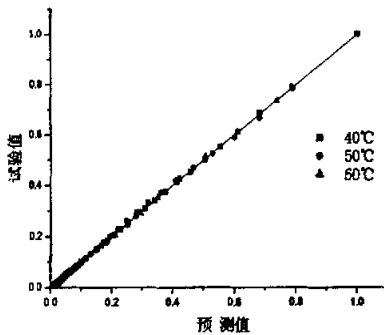


图 2-4 不同温度下所得试验值与预测值的关系

Fig2-4 Comparison of experimental and predicted moisture content at various temperature

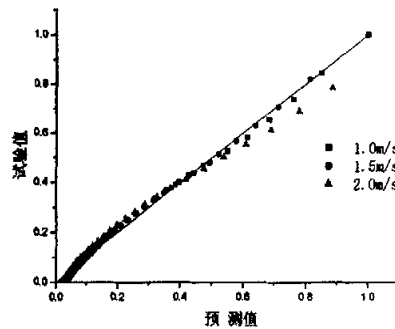


图 2-5 不同风速所得的试验值与预测值的关系

Fig2-5 Comparison of experimental and predicted moisture content at various velocity

而近年来，一些学者对水果、蔬菜干燥模型的研究表明，物料的干燥性质跟物料物理性质密切相关，如组织结构、孔隙度、物料水分组成、自由水和结合水的百分比等。所以，物料不同，干燥曲线会有所不同，模型也随之不一样。İbrahim Doymaz (2005)^[63]提出 Page 模型最适合绿豆干燥，S.Lahsani et al (2004)^[64]推荐 Page 模型为梨的薄层干燥模型。有人报道用 Logarithmic 模型模拟杏^[18]和苹果片^[65]的通风干燥过程以及薄层干燥橄榄蛋糕。^[66]

表 2-4 各模型模拟干燥曲线的数据分析结果

Fig2-4 Results of statistical analyses on the modeling of moisture contents and drying time

模型	R ²	χ^2	RMSE	MBE
1	0.9856	9.83×10^{-4}	0.0302	0.0023
2	0.9941	4.00×10^{-4}	0.0184	0.0047
3	0.9941	4.00×10^{-4}	0.0172	0.0048
4	0.9925	3.17×10^{-4}	0.0156	0.0026
5	0.9930	2.67×10^{-4}	0.0129	0.0023
6	0.9973	2.00×10^{-4}	0.0807	0.0025
7	0.8966	7.20×10^{-4}	0.0272	0.021
8	0.9871	9.50×10^{-4}	0.00835	0.003
9	0.9975	1.33×10^{-4}	0.015	0.0017
10	0.9961	2.83×10^{-4}	0.0302	0.0031

2.2.3 干燥速率

根据试验数据作出水分含量—时间曲线图，然后利用 Origin 软件求出 dM/dt , $-(dM/dt)$ 即为干燥速率。

图 2-6~图 2-9 为干燥速率与水分含量和干燥时间的关系图。干燥速率随着时间的延长和水分含量的降低而连续下降。从图中还可以看出，在猪通脊肉干燥过程中没有恒率干燥阶段，只是单一降率干燥过程。这表明猪通脊肉干燥时，内部水分迁移主导着干燥过程。

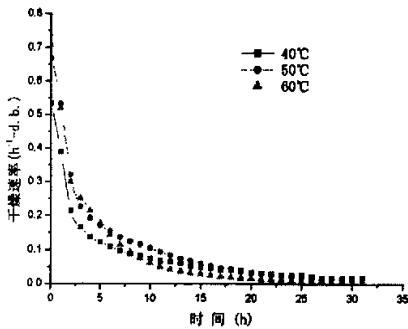


图 2-6 风速为 2m/s 时，不同温度下干燥速率与时间的关系

Fig2-6 Variation of drying rate with drying time at 2m/s of drying air

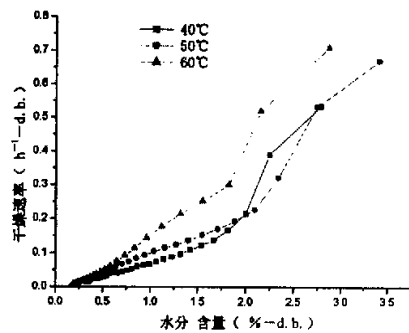


图 2-7 风速为 2m/s 时，干燥速率与干基水分含量的关系

Fig2-7 Variation of drying rate with moisture Content at 2m/s of drying air

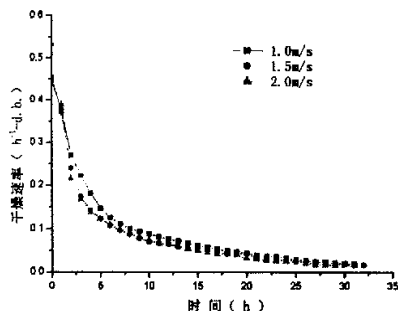


图 2-8 温度为 40℃ 时, 不同风速下干燥速率与时间的关系
Fig2-8 Variation of drying rate with drying time at 40°C of drving air

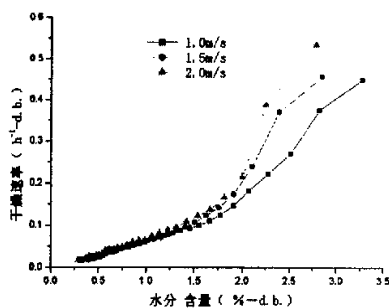


图 2-9 温度为 40℃ 时, 不同风速下干燥速率与干基水分含量的关系
Fig2-9 Variation of drying rate with moisture content at 40°C of drying air

上述图中 3 条速率曲线表明, 干燥速率与水分含量的关系 ($-dM/dt-M$) 服从幂函数分布; 而干燥速率与干燥时间的关系 ($-dM/dt-t$) 则服从指数函数分布。最小二乘法回归结果如下:

当风速不变, 温度变化时

$$\frac{dM}{dt} = 0.5853 \times \exp(-0.2496t) \quad (2-4)$$

$$R^2=0.9510 \quad x^2=0.0010 \quad RMSE=0.0308 \quad MBE=0.0147$$

$$\frac{dM}{dt} = 0.0866M^{1.8108} \quad (2-5)$$

$$R^2=0.9821 \quad x^2=3.72 \times 10^{-4} \quad RMSE=0.0186 \quad MBE=0.0045$$

当温度不变, 风速变化时

$$\frac{dM}{dt} = 0.4227 \times \exp(-0.1906t) \quad (2-6)$$

$$R^2=0.9217 \quad x^2=8.73 \times 10^{-4} \quad RMSE=0.0286 \quad MBE=0.01343$$

$$\frac{dM}{dt} = 0.0547M^{1.9861} \quad (2-7)$$

$$R^2=0.9723 \quad x^2=3.08 \times 10^{-4} \quad RMSE=0.01700 \quad MBE=0.005855$$

从上述回归分析结果可以看出, 相关系数的平方 (R^2) 均大于 0.95, χ^2 (平均偏差 (MBE) 和均方差 (RMSE) 这三项都小于 0.01, 说明模型能很好地预测干燥速率的变化情况; 所以, 干燥速率与水分含量的关系服从幂函数分布, 干燥速率与干燥时间的关系服从指数函数分布。

2.2.4 扩散系数 D_e

扩散系数反映了内部水分扩散的快慢, Crank (1956) [67] 在一系列的假设基础之上, 提出了

各向同性的物料内水分扩散方程式:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (2-8)$$

假设物料起始水分分布均匀, 在脱水过程中, 表面水分浓度保持不变, 方程(2-8)的解如下:

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^3 \times \exp \left\{ -D_e \cdot t \left(\frac{\pi^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_a^2} + \frac{1}{L_b^2} + \frac{1}{L_c^2} \right) \right\} \quad (2-9)$$

式中 L_a 、 L_b 和 L_c 为矩形样品的半长、半宽和半厚。

Andrien 和 Stamatopoulos (1986)^[68]提出了一个简单的、计算 D_e 值的公式, 此公式已被广泛应用于多种食品。但是 Yasuyuki Konishi 等 (2001)^[69]在研究鱼糜肠时发现, 由于圆柱肠的长度不够长, 未远大于半径, 不能近似认为样品为无限长圆柱体。因此, 他们在公式 (2-9) 基础上, 作了如下改进, 假设圆柱体样品为等表面积的正棱柱, 边长为 $k \cdot r_c$, 高为 h_c 。

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^3 \times \exp \left\{ -D_e \cdot t \left(\frac{\pi^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{2}{(k \cdot r_c)^2} + \frac{4}{h_c^2} \right) \right\} \quad (2-10)$$

式中 r_c 为圆柱体半径, h_c 为圆柱体高, k 为表面积校正系数。

针对于本试验圆柱体猪通脊肉样品 (19mm×70mm), k 等于 0.804。

扩散系数 D_e 根据斜率法^[15]计算: 比较试验所得干燥曲线 ($M - M_e / M_0 - M_e - t$) 与理论扩散曲线 ($M - M_e / M_0 - M_e - F_0 = (\pi^2/4) \cdot [2/(k \cdot r_c)^2 + 4/h_c^2]$) 上各点的斜率。曲线斜率运用 origin 软件微分而得。

$$D_e = \frac{\left[\frac{dM}{dt} \right]_{\text{exp}}}{\left[\frac{dM}{dF_0} \right]_{\text{theo}}} \quad (2-11)$$

图 2-10、图 2-11 表达了扩散系数 D_e 与水分含量的关系。

从图中可以看出: 扩散系数 D_e 随着温度升高而升高, 随风速增加而增加; 并且, 温度对扩散系数的影响大于风速。在脱水前期, 扩散系数随水分含量减小而减小; 在末期, 扩散系数随水分含量减小反而迅速增加。这是因为当物料接近干透时, 内部水分迁移形式转为无阻碍的气相扩散, 所以扩散系数急剧增大。

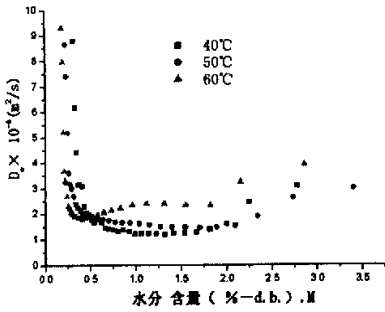


图 2-10 风速 2m/s, 不同温度干燥过程中, 水分扩散系数随干基水分含量的变化关系

Fig2-10 Dependence of moisture diffusivity on moisture content at a constant velocity (V=2m/s)

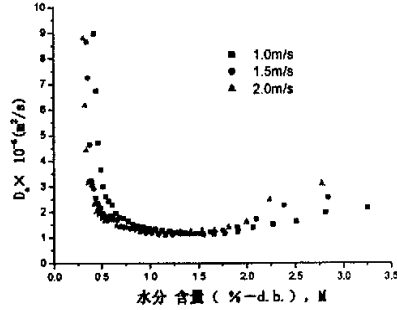


图 2-11 温度 40°C, 不同风速干燥过程中水分扩散系数随干基水分含量的变化关系

Fig2-11 Dependence of moisture diffusivity on moisture content at a constant temperature (T=40°C)

如果假设扩散系数 D_e 在整个干燥过程中恒定, 即公式 (2-10) 中 D_e 视为常数。等式两边取自然对数后, 作图 $\ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right) - t$ 。由直线斜率计算出常量 D_e 。

图 2-12、图 2-13 描述了恒定扩散系数 D_e 随温度和风速的变化关系。图 2-11 表明当空气温度不变时, 扩散系数 D_e 随风速增加先增后减; 图 2-12 表明当空气风速不变时, 扩散系数 D_e 随温度升高而升高。因为当温度升高时, 表面水分蒸发加快, 促进内部水分向表面迁移以补充表面水分, 这样使得水分总体扩散速度增加, 扩散系数增大, 所以扩散系数与温度呈正相关。这与 Arrhenius 表达式表达的信息“扩散系数只与温度有关”一致。

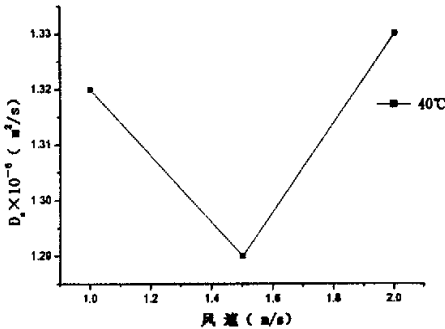


图 2-12 温度为 40°C, 水分扩散系数随风速的变化关系

Fig2-12 The changes in the apparent diffusion coefficients at 40°C air temperature

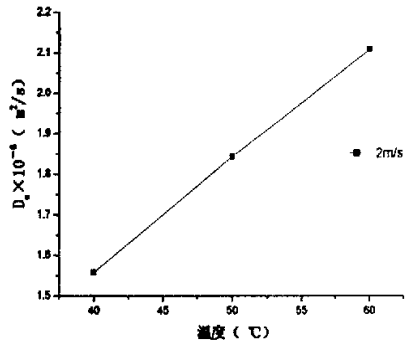


图 2-13 风速为 2m/s 时, 水分扩散系数随温度的变化关系

Fig2-13 The changes in the apparent diffusion coefficients at 2m/s air velocity

2.2.5 扩散活化能 E_a

扩散系数表达了扩散速率的快慢，而扩散活化能的大小决定了扩散过程能否进行。既然食品中水分扩散系数 D ，跟水分迁移机制密切相关，那么扩散活化能也能为水分迁移机理提供一些信息。

$$\text{Arrhenius 表达式: } D_e = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot (T + 273.15)}\right) \quad (9)$$

其中 D_0 为扩散频率，当 $T = \infty$ 时， $D_0 = D_e$

E_a 为扩散活化能 (kJ/mol)

R 为气体常数 (8.31451J/k·mol)

T 为温度

$$\text{等式两边取自然对数: } \ln D_e = \ln D_0 - \frac{E_a}{R \cdot (T + 273.15)} \quad (10)$$

$\ln D_e - \frac{1000}{R(T + 273.15)}$ 关系如图 2-14。

线性回归后，根据斜率可计算出 E_a 。计算结果如下：

表 2-5 不同水分含量时的扩散活化能

Table2-5 Activation energy of various moisture content

干基水分含量 X	扩散活化能 E_a (kJ/mol)
0.5	2.37
0.7	17.64
1.5	24.72

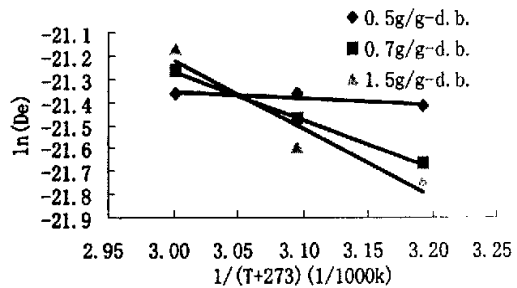


图2-14 扩散活化能与水分含量的关系

Fig2-14 Arrhenius plot of moisture diffusivity

表 2-5 表明，扩散活化能随着水分含量降低而降低。Yasuyuki Konishi 等^[69]在研究鱼糜肠时得到类似的结论，但是 WA.M. McMin 等^[15]研究马铃薯圆柱体样品后得出，扩散活化能随水分含量降低而增加的反相结论。一些学者研究了不同食品的水分扩散活化能，结论见表 2-6。

表中水分扩散活化能的变化主要因为水分含量不同。此外，很有可能由于食品水分子组成发生改变以及水分扩散路径上孔隙结构的动态变化所致。因此，水分状态和孔隙度是研究干燥曲线的两个有效参数。^[69]

表 2-6 不同食品水分扩散活化能

Fig2-6 Activation energy (E_a) for moisture diffusion in various food materials

食品	E_a (kJ/mol)	水分含量 (%—d. b.)	文献
马铃薯	25.2—36.2	400—100	Mcminn and Magee(1996) ^[70]
意大利面条	22—26	23—5	Litchfield and Okos(1992) ^[71]
意大利面条	25—26	23—5	Waananen and Okos(1996) ^[72]

2.3 讨论

上述试验未将环境相对湿度作为因子, 视环境相对湿度恒定不变。由干燥理论知, 干燥介质的相对湿度愈低, 水分汽化愈快, 在干燥初期, 影响尤为显著; 干燥介质的温度、风速以及介质流向与干燥介质的相对湿度一起决定物料的脱水速度; 并且, 温度、相对湿度及风速彼此之间存在交互作用。

以传统腊肉烘烤工艺为例, 根据试验中得到的结论, 改进传统烘烤工艺。烘烤为腊肉生产工艺中至关重要的一个阶段; 但是, 目前烘烤工艺存在诸多问题: 烘烤温度恒定而且未考虑环境相对湿度, 干燥程序不符合传热传质原理, 导致肉表面结膜结痂, 水分很难透过表皮蒸发出去, 降低效率, 浪费能源, 生产周期长, 而且影响产品质量。

以试验所得的猪通脊肉干燥脱水动力学理论作指导, 可以将腊肉烘烤工序分三个阶段进行。

1) 预热阶段

本试验得到猪通脊肉干燥过程完全受内部水分迁移控制, 即内部水分迁移速率决定了脱水速率。内部水分迁移的推动力为水分梯度, 水分梯度越大, 推动力越大, 水分从内到外的迁移速率也就越大。由雷科夫现象知, 当物料内存在温度梯度时, 水分将从高温区向低温区迁移。所以, 在烘烤之前对原料肉低温预热(相对湿度最好 $\geq 90\%$), 使肉块从内到外建立水分梯度, 为后续快速脱水作准备。

2) 高温低湿脱水

从前述的干燥曲线以及脱水速率曲线可以看出, 在脱水的初始阶段, 脱水速率较高, 水分含量迅速降低, 同时脱水速率也迅速降低, 约 4、5h 后, 水分含量缓慢降低, 此时, 脱水速率也缓慢降低。烘烤初期肉表面水分较高, 而且内部水分靠预热阶段建立的水分梯度推动, 能够快速、及时的补给至肉表面。因此, 为了提高烘烤效率, 在脱水初始阶段, 应该提供高温低湿环境, 提高表面蒸发速度, 促进内部水分向外迁移, 增加脱水速率。

3) 低温高湿烘烤

经过高温低湿脱水后, 肉表面水分降至较低水平, 内部水分梯度也逐渐减小, 推动力减小, 内部水分向表面扩散速度降低。此时, 必须降低表面水分的蒸发速度, 使表面水分蒸发速度和内部水分迁移速度平衡, 以免表面水分蒸发太快, 内部水分来不及补给, 导致肉表面结膜、结壳, 阻碍水分从表面蒸发出去。所以, 在脱水后期, 应降低环境温度, 提高环境相对湿度。

上述试验还得出, 温度是干燥速率的主要影响因素, 风速影响很小。在设计某种物料脱水工艺时, 应该主要控制温度; 而基于节能考虑, 风速可稍微低点, 能使烘房或烘箱内空气循环, 排

除湿气即可，推荐风速 1.0m/s。

由于改良 Henderson-Pabis 模型为模拟猪通脊肉干燥曲线的最佳模型，所以，此模型可用于预测肉制品脱水情况，根据模型公式计算出达到目标水分含量所需要的脱水时间，避免盲目延长脱水时间，浪费能源，而且降低产品质量。

2.4 本章小结

本章以 19mm×70mm 圆柱体通脊肉为研究对象，分析温度和风速对干燥曲线、脱水速率的影响规律。用十种其他物料的最佳干燥模型对试验所得的数据进行回归，得出了以下结论：

- 1) 猪通脊肉干燥过程完全受内部水分迁移控制。
- 2) 干燥速率与水分含量的关系服从幂函数分布：

$$\frac{dM}{dt} = 0.0866M^{1.8108}$$

而干燥速率与干燥时间的关系则服从指数函数分布：

$$\frac{dM}{dt} = 0.5853 \times \exp(-0.2496t)$$

- 3) 试验范围内，温度是干燥速率的主要影响因素；风速影响很小。
- 4) 扩散系数 D_a 与温度正相关，与风速关系不大。
- 5) 扩散活化能随着水分含量增加而增加。
- 6) 改良 Henderson-Pabis 模型：MR=aexp(-kt)+bexp(-gt)+cexp(-ht) 能完美的模拟猪通脊肉的干燥曲线。
- 7) 根据试验所得理论可将腊肉烘烤初步分为预热，高温低湿脱水，低温高湿烘烤三个阶段。

第三章 改进传统腊肉生产工艺中的烘烤工序

前言

本章将以第二章理论研究的结论为基础,改革目前工业上生产腊肉所应用的恒定温度烘烤工艺,解决表皮结痂、干硬等阻碍腊肉发展的问题。建立一套完善的腊肉烘烤工艺,满足腊肉工业化、标准化生产的需要。

在中国,腊肉历史悠久,源远流长,而且带有强烈的民族特色。随着人们生活条件的改善和营养水平的提高,人们对腊肉质量要求也越来越高;这一传统产品的消费市场也逐渐步向营养化、方便化和系列化发展。^[104]很多学者已经分析了目前腊肉生产中存在的诸多问题,并且提出了相应的解决方针和策略。^[105]为了适应腊肉现代化、工业化生产的需要,充分利用现代化工艺技术及设备条件,使之在保持传统特色的前提下,改善其感官和营养特性,延长保质期。所谓烘烤,就是肉或其半成品通过热力(电热、明火、气热、微波等)进行熟化和烘(烤)干的过程。通过烘烤,肉或肉的半成品的色泽、滋味、水分含量发生一系列变化,从而使肉制品表面干爽,烤香浓郁,滋味诱人,色泽更好。^[106]

肉制品在烘烤过程中,烘烤的温度和时间对肉制品的色泽影响较大。在腊肉制作过程中,烘烤是最关键的工序之一,直接影响产品质量。根据传递原理,在烘烤过程中的传热传质同时进行,但方向相反,而且在传统工艺中两者之间相互影响较大,因此所得到的产品表层与内部的含水量差异过大。

烘烤脱水时,伴随着两个传质过程:表面水分汽化速率(V_1)和内部水分扩散速率(V_2)。当 $V_1 > V_2$ 时,内部水分迁移为脱水控制步骤,即内部扩散控制;当 $V_1 < V_2$ 时,表面水分汽化为脱水控制步骤,即表面汽化控制。水分的内部扩散速率与表面汽化速率近于相等的场合是少见的。实际上,在干燥过程中,某些物料水分表面汽化的速率小于内部扩散速率,而另一些物料,则水分表面汽化速率大于内部扩散速率。表面汽化速率取决于干燥介质的温度、相对湿度、流速以及介质与物料的接触状况;内部水分扩散速率主要取决于湿物料的性质及形状,物料的温度和水分含量。由前面的研究得到,肉制品的脱水过程是单一的降率干燥阶段,即肉制品在烘烤过程中为内部水分控制。因此,随着脱水过程进行,内部水分扩散会不断变化,我们应该随之改变干燥介质的条件,即环境条件。

国内目前腊肉生产中,烘烤过程温度稳定,也没有控制环境相对湿度。所制备的腊肉产品表皮坚硬,很多消费者因此而对腊肉避而远之,成为了腊肉这一民族特色产品的发展瓶颈。造成这种现象的原因是:表面水分汽化速率长时间大于内部水分扩散速率,内部水分无法及时补充到表面,从而导致表皮结膜,这层薄膜会进一步阻碍水分传递。然而,为了使腊肉产品的水分含量降至要求范围内,继续脱水最终导致表面结痂。

为改善产品质量,根据前面理论研究所的结论将烘烤过程分三个阶段进行:预热;高温低湿;低温高湿。本章将设计试验具体确定烘烤参数。

3.1 材料与方法

3.1.1 试验原料

猪后腿肉或五花肉（购自超市发学院路店）、食盐、白糖、葡萄糖、亚硝酸盐、异抗坏血酸钠、香辛料等。

3.1.2 试验仪器

TC-P2A 全自动测色色差计	北京鑫奥依克光电技术有限公司
DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱	上海精宏实验设备有限公司
铂电阻温度传感器 STT-P 系列 ϕ 4mm	北京赛亿凌科技有限公司
DNP-9082 型 电热恒温培养箱	上海精宏实验设备有限公司
BVRJ-60 真空滚揉机	杭州艾博科技工程有限公司
BYXX-50 烟熏箱	杭州艾博科技工程有限公司
DNP-9082 型 电热恒温培养箱	上海精宏实验设备有限公司
Model 235 Warner-Bratzler Meat Shear	G-R Manufacturing CO.

3.1.3 试验方法

3.1.3.1 单因素试验

预热 因条件限制，无法保证环境相对湿度为 100%，在电热培养箱内放入一杯水，以提高箱内空气相对湿度，温度设为 40℃，并用温度传感器监测肉块的中心温度。先对新鲜原料肉预热，考查鲜肉在预热过程中，中心温度随预热时间的变化。然后样品先经过预滚揉、注射、静置后再预热，记录腌制样品在预热不同时间后的中心温度。

高温低湿脱水 取两块肉样按照之前初步确定的预滚揉、注射、静置、腌制工艺处理，然后在温度为 80℃，相对湿度为 50% 下，分别烘烤 30min、40min 后，测定其水分含量。

低温高湿烘烤 经过高温低湿脱水后，肉中的大部分水已被脱去，所以这一阶段主要目的除了蒸发水分，还要发色发香。根据文献，肉中内源酶的最适温度为 40℃，为了更好地促进风味物质的形成，故将烘烤温度定为 40℃，相对湿度暂时设为 70%。这样的空气环境下肉块表面水分蒸发速度较慢，跟肉样内部水分向外的补给速度基本一致，符合干燥传热传质原理。因此不会造成表面结壳硬化，内外硬度不一致，表硬内软，内部水分无法穿越表皮硬壳，终产品水分含量偏高等不良现象。

原料肉按照前面定下来的工艺进行腌制、预热、脱水后再低温高湿烘烤 16h 后，水分含量能够降到 25~30%，但是肉样肌肉颜色太浅，跟水煮肉颜色相似，可能是因为肉块长时间处于较高水分状态且相对高温、高湿下所致。为了进一步研究，进行了下面的试验。

分别对预热阶段和高温低湿脱水阶段的时间设定不同水平，然后高温低湿烘烤 18h 测定水分含量和肌肉表面红度值。

表 3-1 因子水平表

Table3-1 Factors and levels

因子	预热时间 (h)	高温低湿脱水时间 (min)
水平一	0	20
水平二	2	30
水平三	3	—

3.1.3.2 正交试验

烘烤工序主要要解决的问题是降低肉中水分含量，而由干燥原理知，预热、高温低湿脱水、低温高湿烘烤三位一体，相互影响，相互制约。故必须做正交试验，并且考虑各因子间的交互作用。

从超市购买新鲜原料肉，切块、修整，滚揉预处理；同时，配制腌制液（NaCl2.5%，糖 0.6%）。待滚揉结束后，均匀注射，静置。下面设计试验研究烘烤最佳参数。

经单因素试验后，确定正交试验因子水平，见表 3-2，表 3-3。评价指标为：红度值、剪切力、水分含量和感官评分。

表 3-2 正交试验因子水平表

Table3-2 Factors and levels

因子	预热	预热	脱水	脱水	脱水	烘烤	烘烤
	温度 A	时间 B	温度 C	湿度 D	时间 E	湿度 F	时间 G
水平	30℃	2h	70℃	40%	30min	60%	15h
	40℃	3h	80℃	50%	40min	70%	17h

注：脱水为高温低湿阶段；烘烤为低温高湿阶段；低温高湿阶段恒定为 40℃

表 3-3 表头设计

Table3-3 Design of table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		A		D				C			C			
A	B	×	C	×			D	×			×	E	F	G
		B		E				E			D			

3.1.3.3 测定方法

水分含量： 参见 GB9695. 15-88

红度值：TC-P2A 全自动测色色差计。取一小块纯肌肉肉样，切碎，放入色差计样品盒，将样品按平，盖严整个样品盒底部，以免漏光。做三次平行，每次重复都需重新填样。

剪切力：沃一布氏剪切仪。只需测肌肉的剪切力，样品切成 4×0.5×0.5cm 的长方体，用保鲜膜包裹肉样，贴好标签，放入塑料带，系上口，在 80℃水浴中蒸煮 1h 后，冷却，立即测定。做三次平行。

3.1.3.4 数据分析

数据统计分析采用 SPSS12.0 完成；
图形、图像处理采用 Origin6.0、Excell2000 完成。

3.2 结果与分析

3.2.1 单因素试验

3.2.1.1 预热

图 3-1 为鲜肉的中心温度随预热时间的变化关系图，而腌制后的肉样在烘烤过程中的中心温度随时间的变化关系见表 3-4。

a 鲜肉中心温度随预热时间的变化关系：

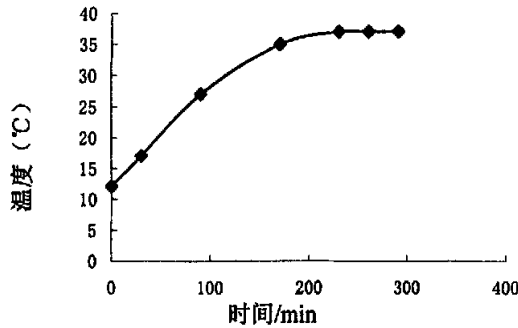


图 3-1 鲜肉中心温度随预热时间的变化

Fig3-1 Variation of the center temperature of fresh meat with heating time

b 腌制后肉样中心温度随预热时间的变化：

表 3-4 经腌制后肉样中心温度随预热时间的变化情况

Table3-4 Variation of the center temperature of cured meat with heating time

时间 (min)		180	240	270	290	350	430
温度 (°C)	样品一	35	35	35	35	36	36
	样品二	36	36	36	36	36	37

由图 3-1 可知，鲜肉预热时，前 180min 肉中心温度升高很快，在 180—250min 之间缓慢升高，250min 后温度恒定。因此，在研究腌制后的肉样预热过程中心温度时，监测的起始时间也定在了 180min，得到的结果跟鲜肉基本一致，在 180min 后肉样中心温度基本稳定。所以，单从建立水分梯度来讲，预热时间取 3h 足够，此时，肉块温度跟环境温度相等，无法再从环境中获得热量来建立水分梯度了。

3.2.1.2 高温低湿脱水

样品水分含量如下表所示：

表 3-5 样品经高温低湿脱水后的水分含量

Table3-5 Moisture content of sample after dehydration by high temperature and low humidity

					均值	标准偏差
样品一 (30min)	40%	45%	46%	34%	41.3%	5.5%
样品二 (40min)	51%	44%	45%	—	46.7%	3.8%

在脱水 40min 后,发现肉样开始轻微滴油,说明表面水分蒸发速度太快,强度太大,内部水分供给不足,导致肉温升高,脂肪融解。

样品二脱水 40min 后反而比样品一脱水 30min 后的水分含量高,可能是因为样品物理尺寸所引起的,前面已经提到水分蒸发的快慢跟肉样宽度关系很大;此外就是取样时的肥瘦肉比例不同所致。由于鲜肉中肌肉水分含量 70~80%,而脂肪中水分含量约为 8%,故若取样时瘦肉含量高于脂肪含量就会导致测得的水分偏高。

3.2.1.3 低温高湿烘烤

经过高温低湿脱水后,肉中的大部分水已被脱去,所以这一阶段主要目的除了蒸发水分,还要发色发香。根据文献,肉中内源酶的最适温度为 40℃,为了更好地促进风味物质的形成,故将烘烤温度定为 40℃,相对湿度暂时设为 70%。这样的空气环境下肉块表面水分蒸发速度较慢,跟肉样内部水分向外的补给速度基本一致,符合干燥传热传质原理。因此不会造成表面结壳硬化,内外硬度不一致,表硬内软,内部水分无法穿越表皮硬壳,终产品水分含量偏高等不良现象。

图 3-2 为不同处理样品的水分含量,各样品的红度值见表 3-5

a 样品的水分含量如下图:

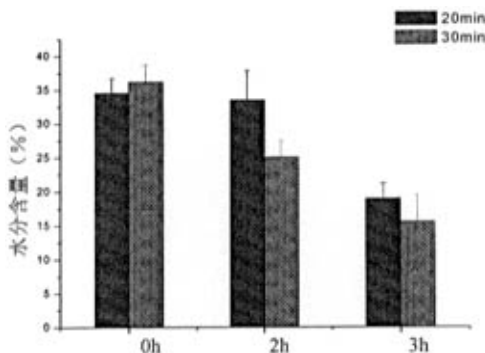


图 3-2 不同前期处理的水分含量

Fig3-2 Moisture content of different ahead treatment

为了检验预热是否有利于水分蒸发,对预热不同时间的水分含量值做方差分析。分析结果如下:

三个数据样本经检验均服从正态分布,独立而且方差齐性。

表 3-6 不同预热时间对水分含量影响的方差分析结果

Table3-6 ANOVA moisture content as a function of preheating time

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性概率
组间误差	458.842	2	229.421	13.942	0.006
组内误差	98.733	6	16.456		
总和	557.576	8			

显著性概率 p 等于 0.006, 小于 0.05, 故预热对水分含量有显著影响, 即说明预热阶段有必要。

表 3-7 不同前期处理样品的红度值

Table3-7 Red value of sample as a result of different ahead treatment

预热时间	脱水时间	红度均值	标准偏差
0h	20min	25.66	0.56
	30min	27.58	1.97
2h	20min	27.96	1.15
	30min	28.88	1.00
3h	20min	24.36	1.0
	30min	23.80	1.18

b 色差分析结果

从图 3-2 和表 3-7 可看出, 预热 2h、脱水 30min 所得到的产品水分含量为 25%, 红度值为 28.88, 两项指标均为最佳。从图 3-2 还可知, 预热时间越长, 高温低湿脱水时间越长, 水分含量越低。经过单因素试验后得出了最佳烘烤工艺:

预热: 温度 40℃, 时间 2h

高温低湿阶段: 温度 80℃, 相对湿度 50%, 时间 30min

低温高湿阶段: 温度 40℃, 相对湿度 70%, 时间 18h

3.2.2 正交试验

此为多目标正交试验, 对各指标分别做方差分析得, 因子 A 对产品红度值影响极显著 ($p < 0.01$), 因子 C 和因子 D、E 的交互作用 D×E 对产品红度值有显著影响 ($p < 0.05$); 因子 B、D、G 对腊肉终产品剪切力有显著影响 ($p < 0.05$); 因子 A 对腊肉终产品感官评分影响显著 ($p < 0.05$), 因子 F 对腊肉终产品感官评分影响极显著 ($p < 0.01$); 因子 G 和交互作用 C×D 对腊肉终产品的水分含量影响均显著。根据红度值指标可确定最优方案为 D₁E₁ 或 D₂E₂; 根据剪切力指标可得 B₁, D₂, G₁ 为最优; 根据感官评分指标可得 A₂, F₁ 为最优; 根据水分含量指标可得最优方案为 C₁D₁ 或 C₂D₂。由于上述单独考虑各指标得到的最优方案之间存在矛盾, 下面我们采用综合评分法进行分析。

各指标的评分标准见表 3-8, 根据试验情况, 四个指标的重要顺序为感官评分>水分含量(剪切力)>红度值, 各指标得分占综合分数的权重分别为 35%、25%、25%和 15%, 即:

$$\text{综合评分} = \text{感官评分} \times 0.35 + \text{水分含量} \times 0.25 + \text{剪切力} \times 0.25 + \text{红度值} \times 0.15$$

表 3-8 各指标得分

Table3-8 Scores of every index

	5分	4分	3分	2分
红度值	>40	>30	>20	<20
剪切力 (kg)	<2	<3	<4	>4
水分含量 (%)	23-25	21-23 或 25-27	27-29	29-31

正交试验计算结果见表 3-9。方差分析得，因子 F、G 对结果影响极显著 ($p < 0.01$)，因子 C、D 的交互作用 C×D 对结果有显著影响 ($p < 0.05$)。因此，因子 F 应选择 F₁，因子 G 选 G₂；因子 C、D 均不显著，C×D 显著，所以选交互效应 (cd)_{ij} 中最大者所对应的水平 C_iD_j 为优水平组合。根据因素 C、D 的二元素表，由公式计算交互作用 C×D 的交互效应 (cd)_{ij} (见表 3-10)，(cd)_{ij} 最大者为 C₁D₁ 或者 C₂D₂，所以因子 C、D 的最优组合为 C₁D₁ 或者 C₂D₂。其他不显著因子结合考虑节能及经济效益均选择水平一。所以，最优方案为 A₁B₁C₁D₁E₁F₁G₂ 或者 A₁B₁C₂D₂E₁F₁G₂。

为了进一步确定因子 C、D 的最优水平，而且烘烤第二阶段，高温低湿段为烘烤过程中非常重要的阶段，故选出 C、D、E 做正交试验 (见表 3-11)，其余因子已确定水平。

表 3-9 正交试验计算结果

Table3-9 Results of experiments

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	综合评分
			A		D				C			C				
	A	B	×	C	×			D	×			×	E	F	G	
			B		E				E			D				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3.53
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3.65
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	3.38
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	3.75
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	3.65
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	3.52
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	3.35
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	3.62
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	4.12
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	3.10
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	3.00
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	3.93
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2.97
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	3.33
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	4.03

16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	3.25
K _{1j}	28.5	28.5	27.9	27.9	28.6	28.7	27.4	28.0	27.5	27.8	28.1	28.8	28.0	29.6	26.5	
K _{2j}	27.7	27.7	28.3	28.3	27.6	27.5	28.8	28.2	28.7	28.4	28.1	27.4	28.2	26.6	29.7	
R _j	0.72	0.74	0.4	0.44	0.94	1.12	1.42	0.12	1.14	0.68	0	1.46	0.17	2.94	3.24	
S _j	0.03	0.03	0.01	0.01	0.06	0.08	0.13	0	0.08	0.03	0	0.13	0	0.54	0.66	

表 3-10 (cd) _{ij} 值表

Table3-10 Values of (cd) _{ij}

	D ₁	D ₂
C ₁	0.09	-0.09
C ₂	-0.09	0.09

表 3-11 因素水平表

Table3-11 Factors and levels

	脱水温度 C (°C)	脱水相对湿度 D(%)	脱水时间 E (min)
水平一	70	40	20
水平二	80	50	30
水平三	90	60	40

因子水平趋势图如下:

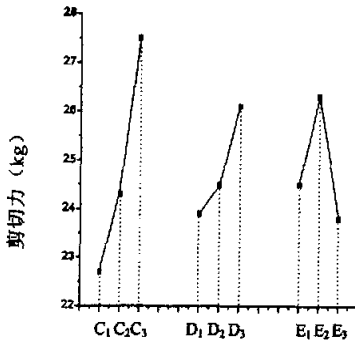


图 3-3 剪切力趋势图

Fig3-3 Trend of shearing force

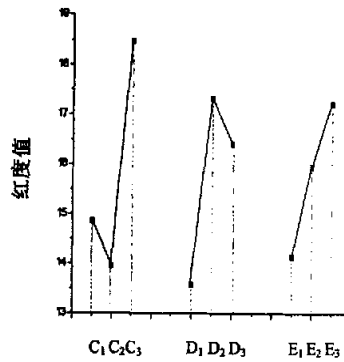


图 3-4 红度值趋势图

Fig3-4 Trend of red value

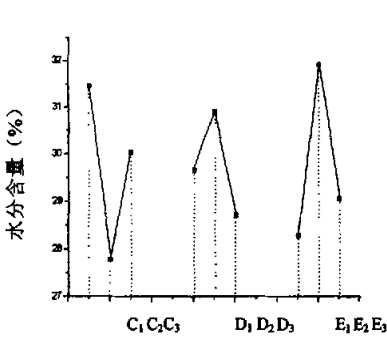


图 3-5 水分趋势图

Fig3-5 Trend of moisture content

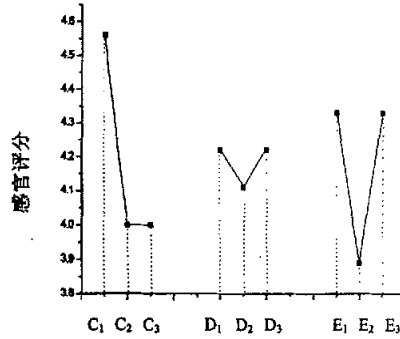


图 3-6 感官趋势图

Fig3-6 Trend of sensory evaluation

因子对指标的影响主次顺序如下：剪切力指标：C>E>D；红度值指标：C>D>E；水分指标：C>E>D；感官指标：C>E>D。

因子最优组合为：剪切力：C₁D₁E₃；红度值：C₃D₂E₃；水分含量：C₂D₃E₁；感官指标：C₁D₁E₃。

关于水分含量这一指标，所有 9 组试验之间的差别不过在 2 个百分点左右，而且后续烘烤、烟熏工序可以进一步脱水，所以水分含量可以不作为考查的主要指标。同样对于红度值指标，后面的烟熏试验发现，烟熏对红度值有显著影响，并且是随着烟熏时间的延长红度值显著增加，所以红度值在此也可以不予考虑。因此，在优选因子水平时，只需要考虑感官评分和剪切力两个指标。由因子水平趋势图得，三因子的最优组合为 C₁D₁E₃。而此正交试验所确定的因子 E 选 E₃ 水平跟前面的正交试验得出的 E₁ 相矛盾，但是感官评分和剪切力指标的趋势图表明，E₃、E₁ 对应指标值差异很小。此外，由于第二个正交试验并没有考虑因子间的交互作用，故计算得出的因子 E 带来的试验误差可能有一部分来自 C、D 的交互作用。综合考虑后，因子 C、D、E 选择 C₁D₁E₁。

所以烘烤阶段因子的最优为：A₁B₁C₁D₁E₁F₁G₂

3.3 本章小结

本章以第二章理论研究的结论为基础，将目前工业应用的恒定温度单一烘烤改革为控温控湿的三段烘烤。首先，在脱水之前，预热原料肉，建立适当的水分梯度，为后期脱水做准备；接着是高温低湿脱水，在此阶段，增加表面汽化速率快速脱水；紧接着是高温低湿烘烤，这一阶段，除了需要进一步脱水外，还发色增香，为了尽量协调表面汽化速率和内部扩散速率，所以要适当降低环境的吸湿能力，即降低表面汽化速率。用此分段烘烤方法解决了传统单一烘烤方式表面结壳结痂的弊端，在腊肉产品水分含量达到国家标准要求的基础上，增加了产品弹性，改善了口感；而且缩短了烘烤时间，提高了烘烤效率，节省了能源。

通过单因素试验、正交试验，确定的烘烤工艺如下：

预热：温度 30℃，相对湿度 100%，时间 20min

高温低湿脱水：温度 70℃，相对湿度 40%，时间 20min

高温低湿烘烤：温度 40℃，相对湿度 60%，时间 17h

第四章 猪通脊肉吸附等温线

前言

吸附等温线表达了一定温度下,水分活度与水分含量之间的关系。在设计、模拟和优化干燥或贮藏工艺时,产品的吸附特性方面的知识必不可少。^[73]干燥伴随着传热与传质两个过程,在此过程中,产品温度从室温升至干燥媒介(空气)温度左右。利用吸附等温线的相关信息可以选择合适的干燥终点^[74],即终产品最佳水分含量。如果干燥时间太短,那么终产品水分含量太高,从而降低产品的稳定性;相反,如果将终产品水分含量降至最佳水分以下,则会浪费资源,增加产品成本费。^[75]

含水量以及加工过程中添加的盐均能够改变肌肉持水力的大小。^[76]根据吸吸附等温线的信息不仅能够预测食品微生物或物理化学稳定性,而且可以设计、控制脱水工艺。^[77]由于肉制品组成成分复杂,理论上预测吸附等温线不太可能;所以,对于某一特定的肉品,其吸附等温线必须经过试验得出。

在文献中能查到关于不同肉制品吸附等温线的综述性文章和杂志^[78-80],他们提出的吸附等温线模型各不相同。后来, Clemente, Bon, García-Pascual, Monleón 和 Mulet (2002)^[81], Lonauro, Bakshi, Labuza (1985)^[82]和 Motarjemi (1988)^[21]运用不同的公式模拟不同温度下的碎肉吸附等温线,最后提出 GAB 模型为最优模型。

本试验研究了猪通脊肉在 30℃、40℃、50℃的解吸和回吸等温线的性质。运用 GAB、Chen、Oswin、Chung-Pfost、Henderson、Halsey、BET 七种模型对试验数据进行了模拟。

4.1 材料与方法

4.1.1 试验原料

解吸试验原料:新鲜猪通脊肉,切片,厚约为 1mm。

回吸试验原料:新鲜猪通脊肉,冷冻切片,厚约为 1mm, -18℃预冻后冷冻干燥 30h。

新鲜猪通脊肉购自北京超市发超市。

4.1.2 试验设备

玻璃干燥器(φ120mm)内放置一个金属筐,筐内放置 6 个用于盛样品的小称量瓶(25mm×40mm),筐下为不同浓度饱和溶液。将玻璃干燥器放进恒温水浴锅内,保持温度恒定。

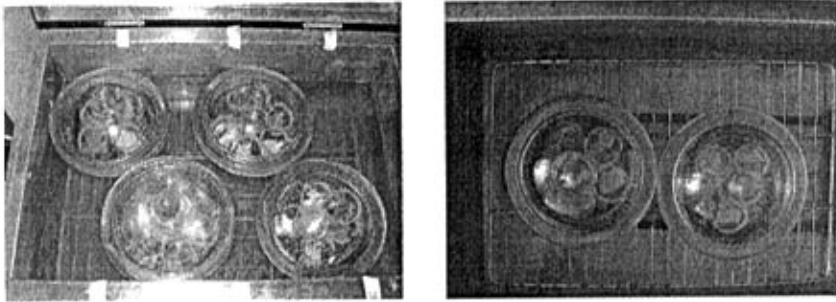


图 4-1 试验装置图

Fig4-1 Photograph of the apparatus for the test

4.1.3 试验仪器

DK-8B 型 电热恒温水槽	上海精宏试验设备有限公司
DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱	上海精宏试验设备有限公司
Acculab ALC 系列电子天平	美国艾科勒有限公司

4.1.4 试验方法

在恒定温度下, KOH、MgCl₂、K₂CO₃、NaNO₃、KCl 和 BaCl₂ 这六种盐的饱和溶液可以给密闭环境提供 5—90% 范围的相对湿度。在不同温度下, 饱和溶液平衡相对湿度见表 4-1。^[83]

表 4-1 六种盐的饱和溶液平衡相对湿度

Table4-1 Selected saturated salt solutions and corresponding relative air humidities

盐	平衡相对湿度 (%)		
	30℃	40℃	50℃
KOH	7.38	6.26	5.72
MgCl ₂	32.38	31.59	30.54
K ₂ CO ₃	43.17	42.30	40.91
NaNO ₃	72.75	71.00	69.04
KCl	83.62	82.32	81.20
BaCl ₂	89.80	89.10	88.23

用六个玻璃干燥器配制上述六种盐的饱和溶液, 液面超过干燥器细口。Kouhila 等 (2000)^[84] 在研究草本香料植物的吸附等温线时, 饱和溶液体积占玻璃罐的 1/4。接着将干燥器移入指定温度的恒温水浴锅内保持 24h, 使溶液温度稳定以及干燥器内相对湿度稳定。

对于回吸试验, 称取 0.2g 左右冷冻干燥样品于称量瓶内, 称量瓶均匀分布在金属管内, 然后移入干燥器。每隔四天, 取出称量瓶称重; 当连续 2 次重量之差小于 0.0002g 时, 认为冻干样品水分在该环境下达到平衡。样品平衡水分按 GB9695.15-88 方法测定, 每一水分活度做三次平行试验。

对于解吸试验, 称取 2g 左右新鲜肉片于称量瓶内, 称量瓶均匀分布在金属管内, 然后移入干燥器。每隔一天称重一次, 当连续 2 次重量之差小于 0.002 时, 认为样品水分在该环境下达到

平衡。样品平衡水分按 GB9695.15-88 方法测定，每一水分活度做三次平行试验。

4.1.5 数据分析

数据统计分析采用 SPSS12.0 完成；

图形、图像处理采用 Origin6.0、Excell2000 完成。

4.2 结果与分析

4.2.1 吸附等温线

食品水分吸附是一个极其复杂的现象：食品中主要的吸水成分为糖和多种聚合物，如蛋白质、淀粉、纤维素、半纤维素等；聚合体的不同极性基团能提供不同的优先吸附位点；此外，当聚合物吸收水分时，其结构、尺寸以及其他一些性质都会在一定程度上发生改变。^[85-86] 吸附水分时还会导致食品中单糖或多糖转变其构像。^[87]

冻干猪通脊肉样品回吸 30d 左右达到平衡，新鲜猪通脊肉样品解吸 15d 左右达到平衡。图 4-2、图 4-3 为 30℃、40℃、50℃ 时猪通脊肉解吸等温线和回吸等温线。从两图中可以看出，当温度一定时，样品平衡水分含量随水分活度增加而单调增加；当水分活度一定时，样品平衡水分含量随温度降低反而升高。解吸等温线随温度的变化规律比回吸等温线随温度的变化规律更明显。许多植物和食品原料吸附等温线都有类似的变化趋势。^[88-90] 这可能是因为，当温度增加时，处于激发态的水分子增多，水分子之间的距离增加，水分子之间的吸引力降低，从而导致相对湿度一定时，物料吸附水分的能力随温度升高反而降低。^[91]

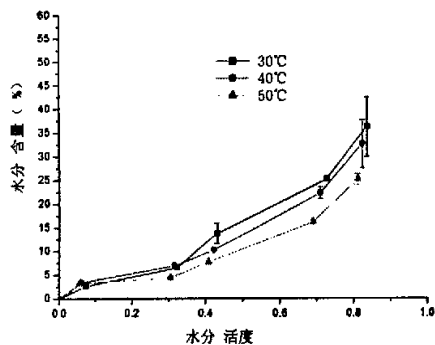


图 4-2 不同温度下猪通脊肉解吸等温线

Fig.4-2 Desorption isotherms at different temperatures

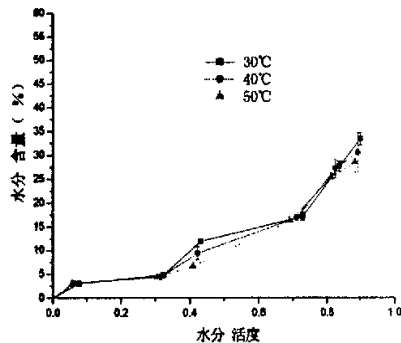


图 4-3 不同温度下猪通脊肉回吸等温线

Fig.4-3 Adsorption isotherms at different temperatures

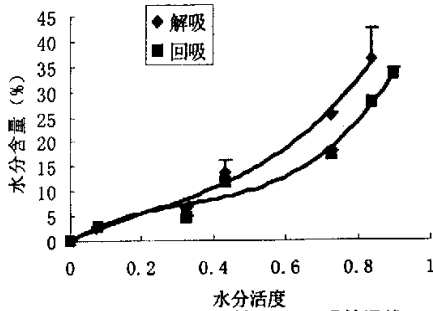


图 4-4 猪通脊肉 30℃时解吸-回吸等温线

Fig4-4 Adsorption-desorption isotherms at T=30°C

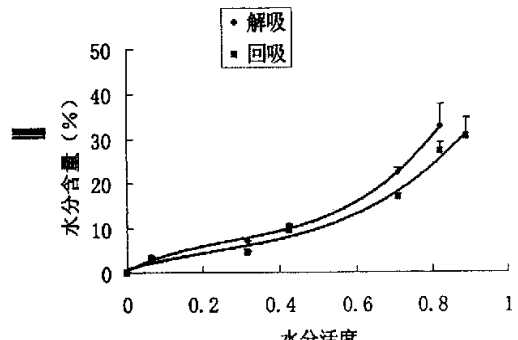


图 4-5 猪通脊肉 40℃时解吸-回吸等温线

Fig4-5 Adsorption-desorption isotherms at T=30°C

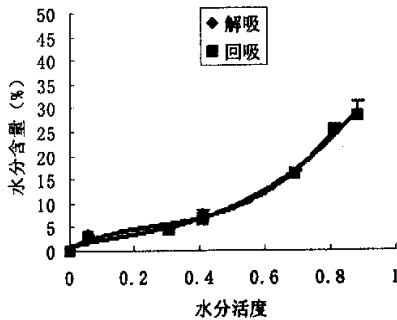


图 4-6 猪通脊肉 50℃时解吸-回吸等温线

Fig4-6 Adsorption-desorption isotherms at T=30°C

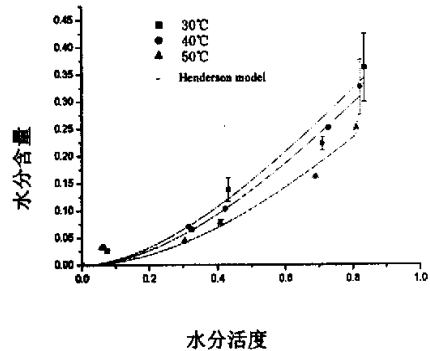


图 4-7 不同温度下猪通脊肉解吸等温线

Fig4-7 Desorption isotherms at different temperature

图 4-4~图 4-6 分别为猪通脊肉 30℃、40℃、50℃的解吸-回吸等温线关系图。显然，回吸等温线和解吸等温线没有完全重叠在一起，存在滞后；当水分活度一定时，解吸过程水分含量比回吸过程水分含量高。很多食品的水分吸附等温线都存在这种滞后现象，滞后作用的大小、曲线的形状和滞后回线 (hysteresis loop) 的起始点和终止点都不相同，它们取决于食品的性质、食品除去或添加水分时所发生的物理变化以及温度、解吸速率和脱水程度等多种因素。已经提出许多定性解释吸附滞后现象的理论，包括溶胀现象、介稳态的结构域、化学吸附、相转变、扩散势垒、毛细管现象和平衡对时间的依耐性等，但是明确描述吸附滞后现象还应该用数学公式来表示。Labuza 等的研究结果证明，如果食物样品采用解吸而不是回吸方法调整到所要求的 A_w 值，其脂类的氧化作用将进行的更快，例如鸡肉和猪肉的 A_w 值降到 0.70~0.84 范围时，脂类的氧化作用加快。这是因为，在给定的 A_w 值，样品解吸比样品回吸过程含有更多的水分，高水分样品的黏性较低，催化剂流动性变大，基质发生溶胀而暴露出来的催化位点增加，与低水分（回吸）样品比较，氧的扩散作用也略微提高，从而使脂类氧化速率加快。

4. 2. 2 吸附等温线模拟

表 4-2 为前人研究不同物料吸附等温线时，总结出的七种模型。本试验所得的平衡水分含量数据用以下七种模型进行拟合，找出最适于猪通脊肉吸附等温线性质的模型。用统计软件 (SPSS 12.0) 分析试验数据，确定各模型中的常量。

表 4-2 吸附等温线模型
Table4-2 Models for fitting the sorption isotherms

模型名	表达式	参考文献
GAB	$M = CKM_0A_w / [(1 - KA_w)(1 - KA_w + KA_w)]$	Van Den Berg & Bruin, 1981 ^[92]
Chen	$A_w = \exp[A - B \exp(-CM)]$	Chen, 1971 ^[93]
Oswin	$M = A[A_w / (1 - A_w)]^B$	Oswin, 1946 ^[94]
Chung-Pfost	$A_w = \exp[-A/T \exp(-BM)]$	Chung & Pfost, 1976b ^[95]
Henderson	$A_w = 1 - \exp(-ATM^B)$	Henderson, 1952 ^[96]
Halsey	$A_w = \exp(-A/M^B)$	Halsey, 1948 ^[97]
BET	$M = M_0CA_w / [(1 - A_w) + (C - 1)(1 - A_w)A_w]$	Brunauer et al., 1938 ^[98]

注: A, B, C, K 为吸附等温线模型常数; A_w 为水分活度; M 为干基水分含量; M_0 干基单层水分含量; R 为气体常数 (Kcal/mole K); T 为热力学绝对温度 (k)。

30℃、40℃和 50℃的解吸、回吸等温线的七种模型参数见表 4-3 和 4-4。总体上看, 这七种模型模拟解吸等温线的相关系数的平方 (R^2) 比模拟回吸等温线的要大, 说明上述七种模型更适合于描述不同温度下猪通脊肉的解吸等温线。由表 4-3 可得, 模型 Henderson 回归 30℃、40℃、50℃猪通脊肉的回吸等温线时所得的 R^2 分别为 0.9996、0.9997 和 0.9632, 比其他六种模型回归得到的 R^2 要大很多; 由表 4-4 可得, 模型 Henderson 回归 30℃、40℃、50℃猪通脊肉的解吸等温线时所得的 R^2 分别为 0.9994、0.9996 和 0.9997。所以, 在所考查的七种模型中, 模型 Henderson 对猪通脊肉吸附等温线的拟合程度最高, 即该模型最适合描述猪通脊肉吸附等温线的性质。

图 4-7 为 Henderson 模型拟合 30℃、40℃、50℃的解吸等温线的结果。从图中可以看出, 试验数据基本与由 Henderson 模型计算的预测值相符。而许多研究表明, GAB 模型更具有普遍性, 适合描述大多数食品吸附等温线。

表 4-3 七种模型分别模拟 30℃、40℃、50℃猪通脊肉回吸等温线时的参数

Table4-3 Parameter values for seven models in adsorption

模型	温度 (°C)		
	30	40	50
GAB			
C	-1.70E+09	-1.68E+09	-1.08E+09
K	0.8260	0.8340	0.8433
M ₀	0.2477	0.2449	0.2416
R ²	0.8974	0.8889	0.8857
Chen			
A	-0.7847	-0.8579	-0.8938
B	3.1258	3.0996	3.0918
C	6.7834	7.2463	7.4460
R ²	0.9984	0.9989	0.9991
Oswin			
A	0.4471	0.4481	0.4476
B	0.3569	0.3643	0.3743
R ²	0.9465	0.9492	0.9527
Chung—Pfof			
A	1012.5	1070.7	729.97
B	3.4191	3.5427	10.7930
R ²	0.9873	0.9893	0.9407
Henderson			
A	0.0045	0.0043	0.0251
B	1.1149	1.0999	1.0695
R ²	0.9996	0.9997	0.9632
Halsey			
A	0.6119	0.6526	0.0403
B	0.5707	0.5325	1.1393
R ²	0.9838	0.9874	0.9832
BET			
C	2.76E+07	4.80E+06	-4.45E+08
M ₀	0.1168	0.1231	0.1303
R ²	0.5368	0.5772	0.6264

表 4-4 七种模型分别模拟 30℃、40℃、50℃猪通脊肉解吸等温线时的参数

Table 4-4 Parameter values for seven models in desorption

模型	温度 (°C)		
	30	40	50
GAB			
C	-1.06E+09	-7.71E+08	2.03E+09
K	0.8876	0.9028	0.9159
M ₀	0.2271	0.2228	0.2192
R ²	0.9261	0.8824	0.8783
Chen			
A	-0.7531	-0.7292	-0.9818
B	3.3260	3.0491	3.0526
C	6.8913	6.2640	8.0726
R ²	0.9945	0.9982	0.9989
Oswin			
A	0.4439	0.4455	0.4464
B	0.4206	0.4320	0.4423
R ²	0.9775	0.9690	0.9709
Chung-Pfost			
A	1056.588	1048.9	1145.02
B	3.5141	3.4277	3.8266
R ²	0.9795	0.9900	0.9874
Henderson			
A	0.0046	0.0043	0.0040
B	1.1274	1.1084	1.0792
R ²	0.9994	0.9996	0.9997
Halsey			
A	0.5766	0.6233	0.7324
B	0.6011	0.5559	0.4785
R ²	0.9835	0.9867	0.9888
BET			
C	59.5642	38.3552	-4.81E+08
M ₀	0.1606	0.1697	0.1728
R ²	0.7951	0.8267	0.8313

M.Kouhila 等 (2002)^[91]报道了 GAB 模型可预测蓝桉树吸附等温线, 且准确度较高。他们

还得出,在相对湿度一定时,平衡水分含量随温度升高而降低。A.Álvarez-Reyes 等(2004)^[99]提出 GAB 模型最适合于描述和预测刺桐吸附等温线。

L.O.Sanni 等(1999)^[100]用模型 GAB、Chung-Pfost、Bradley、Oswin 对 Fufu 吸附等温线进行了模拟。结果发现,在线性模型中,GAB 模型最适合描述试验数据;在非线性模型中,Bradley 模型对试验数据拟合最好。

N.Wang 和 J.G.Brennan (1991)^[101]研究了马铃薯四种温度下的吸附等温线特性。他们得出 GAB 模型和 Oswin 模型适合表征水分活度与马铃薯平衡水分含量之间的关系,水分活度在 0—88% 范围内,GAB 模型预测值与试验值基本一致;水分活度在 0—60% 范围内,Oswin 模型预测值与试验值基本一致。

从上述两表可见,对于 GAB 模型参数而言, M_0 随温度升高而降低;K 随温度升高而增加。

单分子层水分含量减小 (M_0),可能由于当温度升高时,物料内部结构发生改变。M.Kouhila 等(2002)^[91]提出,温度升高后,有些水分子被激活至更高能级,脱离其吸着点,从而降低平衡水分含量。当温度从 30℃ 升至 50℃ 时,回吸、解吸干基单分子层水分含量分别从 0.25% 降至 0.24%、0.23% 降至 0.22%。目前,对分子水平 BET 的单分子层的确切含义还不完全了解,最恰当的解释是把单分子层值看成是在干物质可接近的强极性基团周围形成 1 个 H_2O 分子。从另一种意义上来说,单分子层值相当于与干物质牢固结合的最大数量的水。近来用核磁共振技术研究了蛋白质中结合水的存在状态,证明其中一种是直接与蛋白质结合的水分子,它的旋转运动速率为纯水水分子的百万分之一,属于单分子层水;另一种是位于单分子层水外层的邻近水,邻近水的水分子旋转运动速率为纯水水分子的千分之一,蛋白质分子中的结合水大部分属于这一种。对于大多数干物质食品,由于化学变化而引起的质量损失在单分子层值以下时可忽略不计。^[102]

对于 Henderson 模型,温度在 30℃~40℃ 时,回吸、解吸特征参数 A 分别从 0.0045 降至 0.00251、从 0.0046 降至 0.0040;回吸、解吸特征参数 B 分别从 1.1149 降至 1.0695,从 1.1274 降至 1.0792。由 Henderson 模型公式可知,水分活度是关于特征参数 A、B 的减函数,所以,当水分含量一定时,特征参数 A、B 随温度增加而减小,水分活度随温度增加而增加。

4.3 讨论

吸附等温线表达了一定温度下,水分活度与水分含量之间的关系。各种食品都有一定的 A_w 值,新鲜肉为 0.97~0.98。水分活度反映的是水分与肉品结合的强弱及被微生物利用的有效性。各种微生物的生长发育有最适的 A_w 值。一般而言,细菌生长的 A_w 下限为 0.94,酵母菌为 0.88,霉菌为 0.8。 A_w 下降至 0.7 以下,大多数微生物不能生长发育,但嗜盐菌在 0.7、耐干燥霉菌在 0.65、耐渗透压的酵母菌在 0.61 时仍能发育。前面已经提到,“中间水分食品”(Intermediate moisture food)的一类制品其 A_w 在 0.65~0.85,在这一领域内,细菌相对来说不易繁殖,但霉菌仍能生长且脂肪易发生自动氧化。由 30℃ 时的吸附等温线知,水分活度在 0.65~0.85 时,猪通脊肉水分含量约为 25%~35%。一般情况下,大多数半干肉类制品均在室温下贮藏,温度低于 30℃。本试验还得到,当水分活度一定时,平衡水分含量随温度降低反而升高。所以室温下,半干猪通脊肉水分活度在微生物学相对安全的范围 0.65~0.85 时,其水分含量大约 25%~35%。所以,半干肉

制品在赋予特殊的口感及风味外, 应保持水分含量在 25%~35% 之间。

中国传统腊肉国标要求水分含量小于 25%, 传统腊肉以其独特的风味而备受广大消费者喜爱。但是, 传统腊肉有一个缺点就是质地太硬, 口感欠佳。很显然, 腊肉最终含水量与其质地有很强的相关性, 一般而言, 水分含量越低, 质地越硬。因此, 为了提高传统腊肉的口感, 可以在保证微生物学安全的基础上, 适当地增加水分含量, 提高口感, 促进腊肉进一步发展。

还有一点, 对于传统腊肉水分含量国标要求小于 25%, 有不合理之处。因为真正对微生物起到栅栏作用的是水分活度而不是水分含量, 水分含量不能简单的等效于水分活度。目前, 市场上有五花肉腊肉、后退肉腊肉、纯瘦肉腊肉和猪其他部位腊肉, 原料肉不同, 水分含量与水分活度的关系就不一样。也就是, 不同的原料肉同一水分活度对应的水分含量各不相同。另外, 同一部位的原料肉, 瘦肉/肥肉的比例并非完全一致, 所以, 水分活度与水分含量的对应关系也不完全相同。

总之, 半干制品的终产品水分含量可以根据吸附等温线来确定。对于每一原料都必须具体分析, 研究其吸附等温特性, 确定在正常贮藏条件下, 具有所要求的微生物学安全级别的产品水分含量, 从而避免, 水分含量太低, 影响产品质量; 水分含量太高, 又降低了产品稳定性。

4.4 本章小结

本章以猪通脊肉为研究对象, 研究了猪通脊肉 30℃、40℃、50℃ 的解吸回、吸等温线。得出了以下结论:

1) 温度对吸附等温线有明显影响, 当水分活度一定时, 平衡水分含量随温度升高反而降低; 当水分含量一定时, 水分活度随温度升高而升高。许多食品的吸附等温线都有类似的性质。

2) 解吸等温线和回吸等温线存在滞后。当水分活度相等时, 解吸过程的平衡水分含量高于回吸过程水分含量。

本试验所研究的七种模型更适合于描述不同温度下猪通脊肉的解吸等温线。Henderson 模型对等温线的拟合程度最高, Chen 模型次之, BET 模型拟合效果最差。

室温贮藏下, 半干猪通脊肉水分活度在微生物学相对安全的范围 0.65~0.85 时, 其水分含量大约为 25%~35%。因此推论, 半干肉制品在赋予特殊的口感及风味前提下, 应保持水分含量在 25%~35% 之间。对于每一原料必须具体分析, 研究其吸附等温特性, 确定在正常贮藏条件下, 具有所要求的微生物学安全级别的产品水分含量, 从而避免, 水分含量太低, 影响产品质量; 水分含量太高, 又降低了产品稳定性。

第五章 脱水后体积收缩及内部水分分布

前言

食品干制时常出现的物理变化有干燥、干裂、表面硬化和多孔性形成等。一般而言,细胞失去活力后,它仍能不同程度地保持原有的弹性;但是,如果受力过大,超过弹性极限,即使外力消失,它再也难以恢复原来的状态。干缩正是物料失去弹性时出现的一种变化,这也是不论有无细胞结构的食品干制时最常见的、最显著的变化之一。干缩影响食品成品的外观品质,在一定程度上也会影响干燥速率。

食品干制过程中,物料内部水分分布不断变化。在干制初期,物料内部水分分布基本均匀;随着脱水过程的进行,表面水分蒸发,内部水分向外迁移,导致物料从内到外形成水分梯度,水分梯度反过来又作为内部水分向外迁移的推动力,保证干燥连续进行;在干制末期,物料水分含量较低,内部水分又趋于均匀分布。

本试验研究不同干燥条件,猪通脊肉脱水后干缩程度以及内部水分分布的变化。

5.1 材料与方法

5.1.1 试验原料

干缩试验原料:猪通脊肉圆柱体样品: $\phi 19\text{mm} \times 70\text{mm}$

水分分布试验原料:猪通脊肉圆柱体样品: $\phi 19\text{mm} \times 70\text{mm}$ 、 $\phi 40\text{mm} \times 170\text{mm}$

猪通脊肉购自北京超市发超市店

5.1.2 试验设备

在不锈钢圆柱风管顶端固定一个 SUNON DP200A 型轴流风机 ($\phi 120\text{mm} \times 308\text{mm}$),将其置于 DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱内。样品用网孔规格为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 不锈钢丝网固定于风管内。风速用 D60-2F 型调速器和 QDF-5D 型热球式电风速计进行调节和控制。

5.1.3 试验仪器

DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱	上海精密实验设备有限公司
SUNON DP200A 型风扇	北京神通电器厂
D60-2F 型电动搅拌机调速器	杭州仪表电机厂
QDF-5D 型热球式电风速计	北京环境保护仪器厂
MP502B 型电子天平	上海精密实验设备有限公司

5.1.4 试验方法

5.1.4.1 水分分布

对于 $\phi 19\text{mm} \times 70\text{mm}$ 的圆柱体样品。用 $\phi 20\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的取样器在整条猪通脊肉上取出所需肉样品，用氰基丙烯酸乙酯将铝箔粘贴在圆柱体两端面，以防止水分从端面蒸发，保证内部水分只在半径方向上迁移。用铁网固定样品后，置于金属管内，一并移入干燥箱内金属圆筒进行脱水干燥。在温度 40°C 、 50°C ，风速 1.5m/s 、 2.0m/s ，相对湿度为 30% 条件下，脱水不同时间后测定圆柱体半径方向不同点的水分含量，包括中心点，距中心 5mm 点，距中心 10mm 点即圆柱体边缘。

对于 $\phi 40\text{mm} \times 170\text{mm}$ 的圆柱体样品。用 $\phi 40\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的取样器在整条猪通脊肉上取出 $\phi 40\text{mm} \times 70\text{mm}$ 样品，再取出两个 $\phi 40\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的圆柱体，分别加至 $\phi 40\text{mm} \times 70\text{mm}$ 圆柱体两端，连接处用氰基丙烯酸乙酯粘贴。这样使得圆柱体长度远大于其半径，可近似认为样品为无限长圆柱体，那么内部水分轴向迁移相对于半径方向迁移可忽略不计。然后在圆柱体两端贴上铝箔纸，进一步确保内部水分迁移只发生在半径方向上。用铁网轻微固定后，置于金属管内，一并移入干燥箱内金属圆筒进行脱水干燥。在温度 40°C ，相对湿度 30% ，风速 1.5m/s 条件下，脱水 4h 、 6h 、 8h 后测定不同点水分含量，包括中心点，距中心 10mm 点，距中心 20mm 点五个点的水分含量。对于 $\phi 40\text{mm} \times 170\text{mm}$ 的圆柱体样品，在横纵两个方向取样，分别试验。

5.1.4.2 体积收缩

样品选取 $\phi 19\text{mm} \times 70\text{mm}$ 的圆柱体。在脱水前，在样品上包裹一层保鲜膜，用量筒根据排水法测定其体积，记为 V_0 。然后在不同温度、不同风速条件下，脱水 0h 、 2h 、 4h 、 6h 、 8h 、 10h 后取出，测定体积，记为 V 。

脱水后体积变化为 $\Delta V = V - V_0$ ；体积收缩系数 $S = V/V_0$ (Lozano et al., 1980)。^[35]

脱水试验控制因子及水平如下：

表 5-1 试验因子及水平表

Table 5-1 Factors and levels of experiments

试验号	温度 $^\circ\text{C}$	风速 (m/s)
1	40	1.0
2	40	1.5
3	40	2.0
4	50	2.0
5	60	2.0

5.1.5 数据分析

数据统计分析采用 SPSS12.0 完成；

图形、图像处理采用 Origin6.0 完成。

5.2 结果与分析

5.2.1 水分分布

图 5-1、图 5-2 为温度 40℃、相对湿度 30%和风速 1.5m/s 条件下,分别脱水 2h、4h 后 19mm × 70mm 圆柱体肉样内部水分分布图。从图 5-1 中可以发现,总体干基水分含量为 208.9%的样品,其内部各处水分都相应比总体干基水分含量为 194.5%和 185.9%的高。图 5-2~图 5-4 均能得出类似的结论,样品内部各点的水分含量高低与总体水分含量一致,即如果样品整体水分含量较低,那么样品内部各处水分含量都较低。这点充分说明,猪通脊肉在脱水过程中,内部水分迁移连续进行,中心水分含量最高,从里到外,水分含量依次降低,不会出现跳跃。

图 5-2、图 5-3 为温度 40℃、相对湿度为 30%,风速分别为 1.5m/s、2.0m/s 条件,脱水 4h 后的水分分布图。两种条件下样品总体干基水分含量基本相当,进一步证实了由前面试验得到的结论,脱水速率主要受温度影响,风速影响很小。从图 5-1 到图 5-4,脱水强度依次增大,样品内部水分不断降低,外部边缘水分含量降低到一定程度后就不再继续下降。这样随着干燥过程的进行,样品里外水分含量差异变小,水分分布趋于均匀,曲线越来越平滑。有人报道水分均匀分布会加快干燥速率。[103]

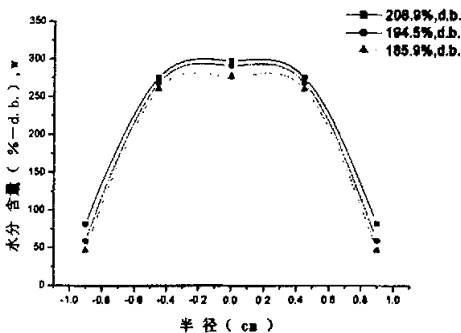


图 5-1 温度 40℃、风速 1.5m/s 脱水 2h 后水分分布
Fig5-1 Moisture content distribution after dehydrating 2h at 40°C,1.5m/s drying air

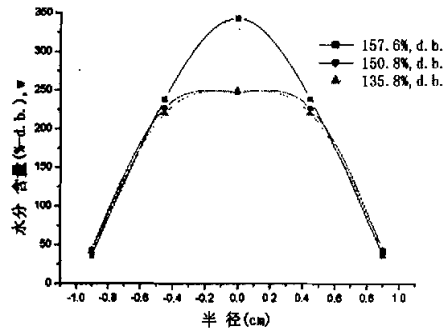


图 5-2 温度 40℃, 风速 1.5m/s 脱水 4h 后水分分布
Fig5-2 Moisture content distribution after dehydrating 4h at 40°C,1.5m/s drying air

图 5-5 为温度 40℃、相对湿度 30%和风速 1.5m/s 分别脱水 4h、6h、8h 后的水分分布图。随着脱水时间的延长,样品内部各点水分含量逐渐降低。从图中还可以看出,内部水分分布曲线并非中心对称,离中心等距离点处水分含量不绝对相等。所以,虽然样品取为圆柱轴对称体,但是由于猪通脊肉各向异性,结构及性质非均一,样品同一半径上各处水分迁移阻力、脱水速率不相等,水分含量因此也不相等。

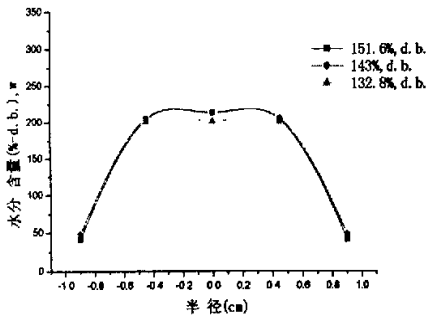


图 5-3 温度 40℃, 风速 2m/s 脱水 4h 后水分分布
Fig5-3 Moisture content distribution after dehydrating 4h at 40℃, 2m/s drying air

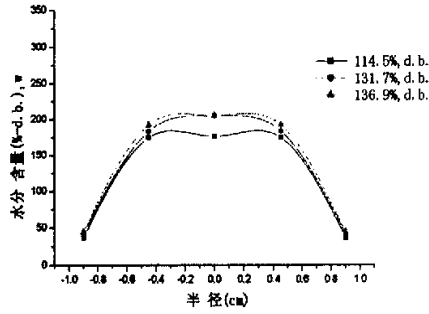


图 5-4 温度 50℃, 风速 1.5m/s 脱水 4h 后水分分布
Fig5-4 Moisture content distribution after dehydrating 4h at 50℃, 1.5m/s drying air

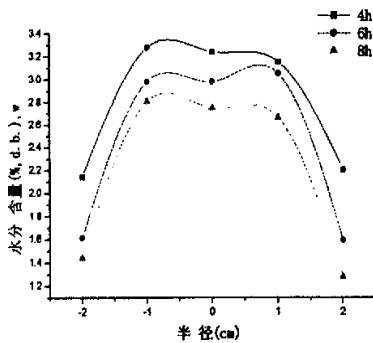


图 5-5 温度 40℃, 风速 1.5m/s 下分别脱水 4h、6h、8h 后水分分布
Fig5-5 Moisture content distribution after dehydrating 4h、6h、8h at 40℃, 1.5m/s drying air

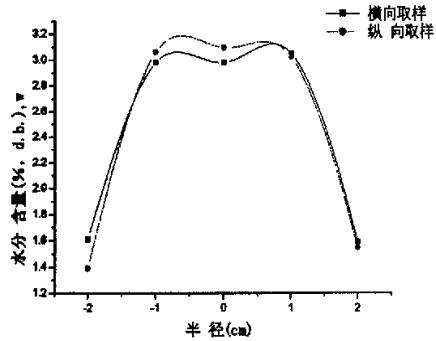


图 5-6 不同方向取样在温度 40℃, 风速 1.5m/s 下脱水 6h 后水分分布
Fig5-6 Moisture content distribution of sample in different direction after dehydrating 6h at 40

图 5-6 表达了在同一块猪通脊肉上横向取样、纵向取样得到的样品在温度 40℃, 相对湿度为 30%, 风速为 1.5m/s 下, 脱水 6h 后水分分布情况。由图可知, 两条水分分布曲线存在交叉, 并且无明显规律。一般而言, 物料内部水分迁移是沿着特定的路径进行的。而对于肉制品, 很多人都预测在脱水过程中, 水分沿着纤维方向迁移。而在本试验中, 不论是横向取样还是纵向取样, 半径方向既不平行于纤维方向, 也不垂直纤维方向。所以本试验设计的两种取样方式对内部水分分布没有明显影响也在预料之中。

5.2.2 体积收缩

5.2.2.1 体积收缩系数的变化

图 5-7、图 5-8 分别为不同温度、不同风速下体积收缩系数与时间的关系。从图中可知, 体

积收缩系数随时间推移而降低；风速为 2.0m/s 时，体积收缩系数随温度升高而降低，即温度越高，体积收缩越快；但在温度为 40℃ 时，风速对体积收缩系数的影响非单调，风速为 1.0m/s 的体积收缩系数最小，风速为 2.0m/s 时体积收缩系数最大，即 $S_{1.0} > S_{2.0} > S_{1.5}$ 。上述变化是因为随着脱水过程进行，水分不断蒸发，导致体积不断收缩；温度越高，水分蒸发越快，体积收缩越大；而温度为 40℃ 时，风速为 1.5m/s 时体积收缩最快，可能是因为在在此温度下，风速为 1.5m/s 时，表面水分蒸发速度与内部水分迁移速度最接近平衡，样品脱水速率最快；风速为 1.0m/s 时，表面水分蒸发速度小于内部水分迁移速率；风速为 2.0m/s 时，表面水分蒸发速度大于内部水分迁移速率，这两种情况脱水效率均较低，浪费能源。

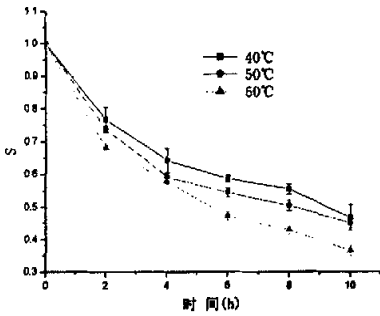


图 5-7 风速为 2.0m/s、不同温度下体积收缩系数与时间的关系

Fig5-7 Shrinkage factor as a function of time, as a result of dehydration at 2.0m/s drying air

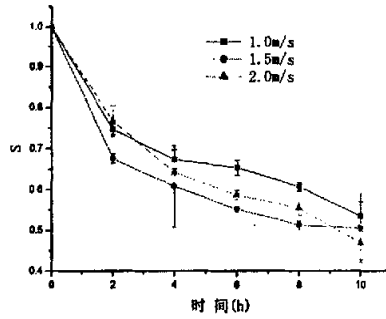


图 5-8 温度为 40℃、不同风速下体积收缩系数与时间的关系

Fig5-8 Shrinkage factor as a function of time, as a result of dehydration at 40℃ drying air

图 5-9 为风速为 2.0m/s，相对湿度为 30%，不同温度下，体积收缩系数与样品水分含量之间的关系，图 5-10 为温度为 40℃，相对湿度为 30%，不同风速下，体积收缩系数与水分之间的关系。由于样品之间的初始水分含量不同，风速与水分含量对体积收缩系数的影响无明显规律。为了消除因初始水分含量不同给分析样品水分含量与体积收缩之间的关系带来影响，转而研究体积收缩系数 (S) 与无因次水分含量 (X/X_0) 的关系，如图 5-11、图 5-12。

由图 5-11 知，在风速 2.0m/s 时，无因次水分含量一定，体积收缩系数受温度的影响可以忽略不计；温度一定时，体积收缩系数与无因次水分含量近似呈线性相关。由图 5-12 知，风速对体积收缩系数的影响要明显大于温度对体积收缩系数的影响。当温度恒定为 40℃ 时，无因次水分含量一定，风速对体积收缩系数存在一个临界点，当无因次水分含量 (X/X_0) 大于 0.63 时， $S_{2.0} > S_{1.0} > S_{1.5}$ ；当无因次水分含量 (X/X_0) 小于 0.63 时， $S_{1.0} > S_{2.0} > S_{1.5}$ ，前面已经论述了风速为 1.5m/s 时体积收缩系数小于风速为 2.0m/s、1.0m/s 的原因。对于 $S_{2.0}$ 与 $S_{1.0}$ 之间的大小关系在无因次水分含量等于 0.63 处存在变化，而且在前面研究脱水动力学时得到了风速对脱水速率几乎没有影响的结论，这可能是因为，在高水分含量区，猪通脊肉弹性完好并呈饱满状态，增加风速至 2.0m/s 时，虽然不会提高脱水速率，但是猪通脊肉能够全面均匀失水，猪通脊肉随着水分消失均衡地进行线性收缩，即圆柱体大小（长度、面积和容积）均匀地按比例缩小，这样比不均匀缩小时的表

观体积的变化小。

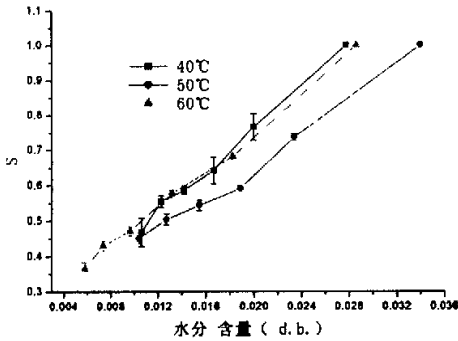


图 5-9 风速为 2.0m/s, 不同温度, 体积收缩系数与水分含量的关系

Fig5-9 Shrinkage factor as a function of moisture content, as a result of dehydration at 2.0m/s drying air

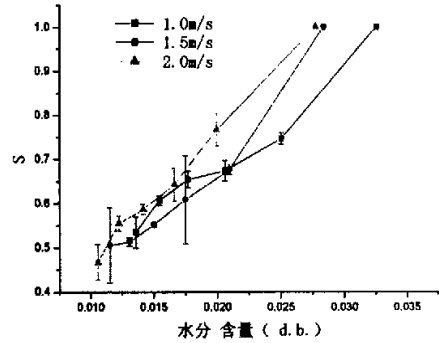


图 5-10 温度为 40℃, 不同风速, 体积收缩系数与水分含量的关系

Fig5-10 Shrinkage factor as a function of moisture content, as a result of dehydration at 40℃ drying air

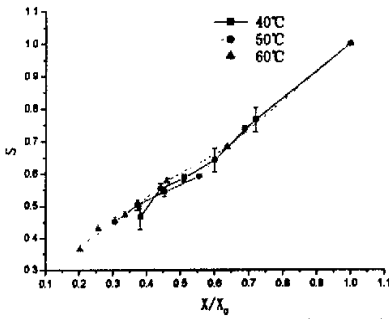


图 5-11 风速 2.0m/s, 不同温度, 体积收缩系数与无因次水分含量的关系

Fig5-11 Shrinkage factor as a function of dimensionless moisture content, as a result of dehydration at 2.0m/s drying air

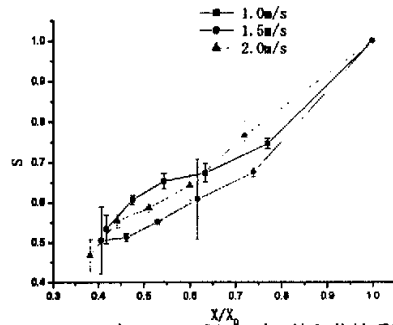


图 5-12 温度 40℃, 不同风速, 体积收缩系数与无因次水分含量的关系

Fig5-12 Shrinkage factor as a function of dimensionless moisture content, as a result of dehydration at 40℃ drying air

5.2.2.2 模拟体积收缩系数

Otoniel Corzo 等 (2004) [104] 研究了沙丁鱼片渗透脱水至不同水分含量时的体积收缩, 提出了以下两个模型:

$$S = A + B (X/X_0) \tag{5-1}$$

$$S = C + DX \tag{5-2}$$

式中 X 为干基水分含量, X_0 为初始干基水分含量;

A 、 B 、 C 、 D 均为模型常数。

表 5-1、表 5-2 分别为风速为 2.0m/s, 相对湿度为 30% 时, 不同温度下体积收缩系数对水分含量和无因次水分含量线性回归的结果。

表 5-2 风速 2.0m/s，体积收缩系数对水分含量的线性回归结果

Table5-2 Linear regression analysis shrinkage factor as a function of the moisture content

温度 (°C) 风速2.0m/s	参数		R	标准误差	P
	A	B			
40	0.1587	0.83909	0.9934	0.001714	<0.0001
50	0.19152	0.79438	0.9882	0.02446	<0.0001
60	0.21421	0.77485	0.9958	0.01692	<0.0001

注: $p < 0.0001$ 表明显著水平 $\alpha = 0.0001$

表 5-3 风速 2.0m/s，体积收缩系数对无因次水分含量的线性回归结果

Table5-3 Linear regression analysis shrinkage factor as a function of the dimensionless moisture content

温度 (°C) 风速2.0m/s	参数		R	标准误差	P
	C	D			
40	0.1587	30.22703	0.9934	0.01714	<0.0001
50	0.19152	23.35017	0.9882	0.02446	<0.0001
60	0.21421	27.08523	0.9958	0.01692	<0.0001

注: $p < 0.0001$ 表明显著水平 $\alpha = 0.0001$

由线性回归结果可知，公式 (5-1)、公式 (5-2) 能够在置信水平为 95% 上，解释 95—99% 体积收缩系数的变异性，相关系数 R 都大于 0.99，标准误差均很小。从上述两表还可以看出，公式 (5-1)、公式 (5-2) 线性回归的相关系数及标准误差相等，而且直线的截距相等。截距相等的意义就是当水分含量小到趋于 0 的时候，两种模型计算的体积收缩系数相等。

图 5-13 为风速 2.0m/s，相对湿度为 30%，不同温度下，体积收缩系数关于水分含量的线性回归图。

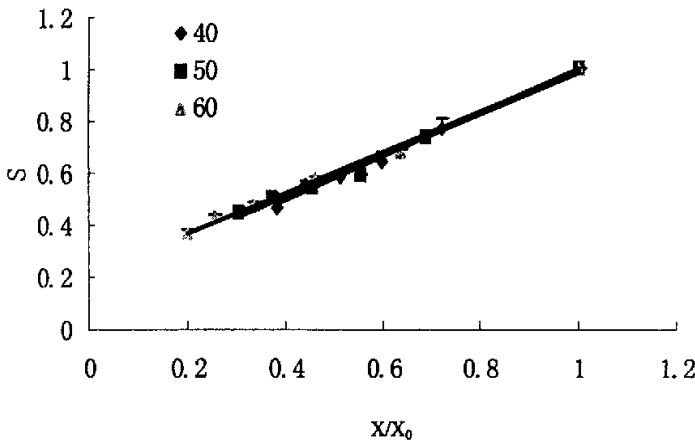


图 5-13 风速 2.0m/s，不同温度，体积收缩系数关于无因次水分含量的线性回归

Fig5-13 Linear regression analysis shrinkage factor as a function of the dimensionless moisture content

Otoniel Corzo 等 (2004) [104] 研究了沙丁鱼片渗透脱水时样品体积收缩与脱水体积的关系，

得出体积收缩为失水体积的函数, 并且样品体积减小量小于失水体积。Kilpatrick 等 (1975)^[36]报道一些蔬菜在脱水时, 其体积收缩与失水体积极为相近。Suzuki 等 (1976)^[105]提出蔬菜根恒率干燥阶段, 体积收缩与蒸发水分的体积相等。Clemente 等 (2001)^[106]发现在 25℃ 条件下干燥时, 猪肉体积减小大于失水体积。

5.3 本章小结

本章研究了猪通脊肉在不同温度、风速条件下脱水后, 体积收缩及内部水分分布情况。

对于脱水时样品内部水分分布得出以下结论:

1) 猪通脊肉在脱水过程中, 内部水分迁移连续进行, 中心水分含量最高, 从里到外, 水分含量依次降低。

2) 随着干燥过程的进行, 样品里外水分含量差异变小, 水分分布趋于均匀。

3) 猪通脊肉各向异性, 结构及性质非均一, 样品同一半径上各处水分迁移阻力、脱水速率不相等, 水分含量均不相等。

横纵两种取样方式所得的样品脱水后内部水分分布没有明显区别。

对于体积收缩得出了以下结论:

1) 体积收缩系数随时间推移而降低; 体积收缩系数随温度升高而降低。

2) 风速对体积收缩系数的影响非单调, 风速为 1.0m/s 的体积收缩系数最小, 风速为 2.0m/s 时体积收缩系数最大, 即 $S_{1.0} > S_{2.0} > S_{1.5}$ 。

3) 温度对体积收缩系数的影响相对于风速对体积收缩系数的影响可以忽略不计。

4) 温度一定时, 体积收缩系数与 (无因次) 水分含量线性相关 $S = A + B (X/X_0)$
 $S = C + DX$

5) 试验涉及的两个线性模型都能很好的模拟体积收缩系数与 (无因次) 水分含量之间的关系。

第六章 结论

1) 猪通脊肉干燥过程完全受内部水分迁移控制。干燥速率与水分含量的关系服从幂函数分布:

$$\frac{dM}{dt} = 0.0866M^{1.8108}$$

而干燥速率与干燥时间的关系则服从指数函数分布:

$$\frac{dM}{dt} = 0.5853 \times \exp(-0.2496t)$$

试验范围内, 温度是干燥速率的主要影响因素; 风速影响很小。

2) 扩散系数 D_e 与温度正相关, 与风速关系不大; 扩散活化能随着水分含量增加而增加。

3) 改良 Henderson-Pabis 模型: $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ 为猪通脊肉干燥曲线的最优模型。

4) 猪通脊肉吸湿等温线性质与一般食品物料的吸湿等温线性质一致; 不论是模拟解吸还是回吸等温线, Henderson 模型: $A_w = 1 - \exp(-ATM^B)$ 对等温线的拟合程度最高。

5) 猪通脊肉在脱水过程中, 内部水分迁移连续进行, 中心水分含量最高, 从里到外, 水分含量依次降低。随着干燥过程的进行, 样品里外水分含量差异变小, 水分分布趋于均匀。由于猪通脊肉各向异性, 结构及性质非均一, 样品同一半径上各处水分迁移阻力、脱水速率不相等, 水分含量均不相等。

6) 体积收缩系数随时间推移而降低; 体积收缩系数随温度升高而降低。风速对体积收缩系数的影响非单调, 风速为 1.0m/s 的体积收缩系数最小, 风速为 2.0m/s 时体积收缩系数最大, 即 $S_{1.0} > S_{2.0} > S_{1.5}$ 。温度对体积收缩系数的影响相对于风速对体积收缩系数的影响可以忽略不计。温度一定时, 体积收缩系数与无因次水分含量近似呈线性相关。两个线性模型: $S = A + B(X/X_0)$, $S = C + DX$ 能很好的模拟体积收缩系数与(无因次)水分含量之间的关系。

7) 腊肉终产品微生物学安全水分含量为 25%~35%; 若烘烤温度 40℃, 风速 1.0m/s 最佳; 最佳烘烤工艺为: (1) 预热: 温度 30℃、相对湿度 ≥90%、2h; (2) 高温低湿: 温度 70℃、相对湿度 40%, 30min; (3) 低温高湿: 温度 40℃、相对湿度 60%、17h。

参考文献

- [1]孙保华, 马丽珍. 肉品科学与技术. 北京: 中国轻工业出版社, 2003, 58~60
- [2]刘邻渭. 食品化学. 北京: 中国农业出版社, 2000, 16~17
- [3]蒋爱民. 畜产食品工艺学. 北京: 中国农业出版社, 2000, 119~120
- [4]刘正怀, 王俊. 切片土豆干燥中传质过程模拟与分析. 科技通报, 2001, 17(4): 6~10
- [5]Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H. I.. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 2001, 26: 457~465
- [6]Al Hodali, R.. Numerical simulation of an agricultural foodstuffs drying unit using solar energy and adsorption process. Ph.D. Thesis, Université Libre de Bruxelles, Belgium, 1997: 309
- [7]Kechaou, N., Bagane, M., Maalej, M. and Kapseu, C.. Approche empirique de la cinétique du séchage des dattes. *Sciences des Aliments*, 1996, 16: 593~606
- [8]Hassan, B. H. and Hobani, A. I.. Thin-layer drying of dates. *Journal of Food Process Engineering*, 2000, 23: 177~189
- [9]Yaldiz, O. and Ertekin, C.. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 2001, 19(3): 583~597
- [10]Kouhila, M.. Etude expérimentale et théorique de cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes et aromatiques de la région de Marrakech. Thèse de Doctorat d'Etat, 2001: 170
- [11]Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M. and Lahsasni, S.. Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus Gobulus. *Drying Technology*, 2002, 20(10): 2027~2039
- [12]Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. and Jaouhari, J. T.. Drying kinetics of Prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 2004a, 61: 173~179
- [13]Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idlaimam, A. and Jamali, A.. Thin layer convective solar drying of Prickly pear peel (*Opuntia ficul indica*). 2004b, *Energy*, 29: 211~224
- [14]Simal, S., et al.. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 2005(66): 323~328
- [15]McMinn, W. A. M., Magee, T. R. A.. Air drying kinetics of potato cylinders. *Drying Technology*, 1996, 14(9): 2025~2040
- [16]Mulet, A., Berna, A., Borrás, M., & Pigana, F.. Effect of the airflow rate on carrot drying. *Drying Technology*, 1987, 5(2): 245~258
- [17]Sarsavadia, P. N., Sawhney, R. L., Pangavhane, D. R., & Singh, S. P.. Drying behaviour of brined onion slices. *Journal of Food Engineering*, 1999, 40: 219~226
- [18]Toğrul, İ.T., Pehalivan, D.. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 2003, 58: 23~32
- [19]洪新华, 李宝国. 稻谷薄层干燥及其颗粒内部传质过程的试验研究. 郑州粮食学院学报, 2000, 21(2): 57~59
- [20]Comaposada, J., Gou, P., Pakowski, Z., & Arnau, J.. Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures. *Drying Technology*, 2000, 18(3): 723~746
- [21]Motarjemi, Y.. A study of some physical properties of water in foodstuffs. Water activity, water binding and water diffusivity in minced meat products. PhD Thesis. Lund University, Lund, Sweden, 1988.
- [22]Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K., Weitnauer, A. C.. Food dehydration. *Handbook of Food*

- Engineering. D. R. Heldman and D. B. Lund. (Eds), 1992, Marcel Dekker, USA: 440
- [23] Ferro Fontan, C., Chirife, J., Sancho, E., Iglesias, H. A.. Analysis of a model for water sorption phenomena in foods. *Journal of Food Science*, 1982, 47: 1590~1593
- [24] Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M., Lahsasni, S.. Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus globules. *Drying Technology*, 2002, 20(10): 2027~2039
- [25] Wang, N., Brennan, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, 1991, 14: 269~287
- [26] Lomauro, C.J., Bakshi, A.S., Labuza, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part 1. Fruit, vegetable and meat products. *Lebensm.-wiss.u-Technology*, 1985, 18: 111~117
- [27] Schar, W., Ruegg, M.. The evaluation of GAB constants from water vapour sorption data. *Lebensm. Wiss. U-Technol*, 1985, 18: 225
- [28] Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Lahsasni, S.. Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan eucalyptus globules. *Drying Technology*, 2003, 20(10): 2027~2039
- [29] Sablani, S.S., Kasapos, S., Al-Rahbi, Y., Al-Mugheiry, M.. Water sorption isotherms and glass transition properties of gelatin. *Drying Technology*, 2003, 20(10): 2081~2092
- [30] Dincen, T.D., Esin, A.. Sorption isotherms for macaroni. *Journal of Food Engineering*, 1996, 27, 211~228
- [31] Oswin, C.R., The kinetics of package life. *J. Chem. Ind.(Lond.)*, 1946, 65: 419~421
- [32] Smith, S.E. The sorption of water vapour by high polymers. *J. Am. Chem. Soc.*, 1947, 69: 646
- [33] Arnosti, S., Freire, J.T., & Sartori, D. J. M.. Analysis of shrinkage phenomenon in *Bachiaria brizantha* seeds. *Drying Technology*, 2000, 18: 1339~1348
- [34] Ramallo, L.A., Pokolenko, J. J., Balamaceda, G. Z., & Schmalko, M. E.. Moisture diffusivity, shrinkage and apparent density variation during drying of leaves at high temperatures. *International Journal of Food Properties*, 2001, 4: 163~170
- [35] Corzo, O., Bracho, N.. Shrinkage of osmotically dehydrated sardine sheets at changing moisture contents. *Journal of Food Engineering*, 2004, 65: 333~339
- [36] Kilpatrick, P. W., Lowe, E., & Van Arsdell, W. B.. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. *Advances in Food Research*, 1975, 50: 313~372
- [37] Charm, S. E.. The fundamentals of food engineering (3rd ed.). Westport: AVI Publishing Co Inc
- [38] Lozano, J. E., Rotstein, E., & Urbicain, M. J.. Total porosity and open porosity in the drying of fruit. *Journal of Food Science*, 1980, 45: 1403~1407
- [39] Viberg, U., Freuler, S., Gekas, V., & Sjöholm, I.. Osmotic pretreatment of strawberries and shrinkage effects. *Journal of Food Engineering*, 1998, 35: 135~145
- [40] Doymaz, I., & Pala, M.. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 2003, 60: 125~130
- [41] Mujumdar, A. S.. Handbook of industrial drying. New York, 1995, Marcel Dekker
- [42] Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K., & Witnauer, A. C.. Food dehydration. IN D. R. Heldman & D. B. Lund (Eds), Handbook of Food Engineering. New York, 1992, Marcel Dekker
- [43] Ince, K.. Raw fermented dry meat products. *Fleischwirtschaft*, 1992, 72(1): 8, 10, 13-14, 16-19
- [44] Rodríguez-Rebollo, M.. "Manual de industrias cárnicas", 1998, Madrid: Ed. Publicaciones técnicas alimentarias
- [45] Miwa, K.. The machine for processing of marine products. Tokyo: Kouseisha-Kouseikaku

- Publishing Corporation, 1983, 3~7
- [46]Noguchi, S.. Science of food and water. Tokyo: Saiwaishobo, 1992, 204
- [47]Henderson, S. M., & Pabis, S.. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1961, 6: 169~174
- [48]Yusheng, Z., Poulsen, K. P.. Diffusion in potato drying. *Journal of Food Engineering*, 1988, 7: 249~262
- [49]Wang, N., Brennan, J. G.. Effect of water binding on drying behaviour of potato. Proc. Eight International Drying Symposium IDS'92, 1992, Quebec: 1350~1359
- [50]Mulet, A., Berna, A., Borrás, M., Pinga, F.. Effect of air flow rate on carrot drying. *Drying Technology*, 1987, 5: 245~258
- [51]Rossello, C., Canellas, J., Simel, S., Berna, A.. Simple mathematical model to predict the drying rates of potatoes. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 1992, 40: 2374~2378
- [52]Fikiin, A. G., Fikiin, K. A., Triphonov, S. D.. Equivalent thermophysical properties and surface heat transfer coefficient of fruit by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 1999, 40: 7~13
- [53]Liu, Q., & Bakker-Arkema, F. W.. Stochastic modeling of grain drying, Part2: Model development. *Journal of Food Engineering Research*, 1997, 66: 275~280
- [54]Zhang, Q., & Litchfield, J. B.. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 1991, 9: 383~395
- [55]White, G. M., Ross, I. J., & Ponekert, R.. Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24: 466~468
- [56]Chhinnman, M. S. Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27: 610~615
- [57]Togrul, I. T., & Pehlivan, D.. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55: 209~216
- [58]Rahman, M. S., Perera, C. O., & Theband, C.. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, 1998, 30: 485~491
- [59]Wang, C. Y., & Singh, R. P.. A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No: 3001. St. Joseph, 1978(MI): ASAE
- [60]Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I.. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 2001, 26: 457~465
- [61]Karathanos, V. T.. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 1999, 39: 337~344
- [62]Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y.. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5: 1261~1265
- [63]Doymaz, İ.. Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*, 2005, 69: 161~165
- [64]Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Ait Mohamed, L., Agorram, B.. Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of prickly pear cactus. *Journal of Food Engineering*, 2004, 27: 103~117
- [65]Kavak Akpınar, E., Bicer, Y.. Modelling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 2003, 26: 515~541
- [66]Akgun, N. A., Doymaz, İ.. Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 2005, 68: 455~461
- [67]Crank, J.. *The mathematical of diffusion*. Oxford University Press, 1956, Oxford
- [68]Andrieu, J., Stamatopoulos, A. A.. Durum wheat pasta drying kinetics. *Lebensm. Wiss. U-*

- Technology, 1986, 19: 448~456
- [69] Konishi, Y., Horiuchi, J., Kobayashi, M.. Dynamic evaluation fo the dehydration response curves of foods characterized by a poultice-up process using a fish-paste sausage. I. Determination of the mechanisms for moisture transfer. *Drying Technology*, 2001, 19(7): 1253~1269
- [70]McMinn, W. A. M., Magee, T. R. A.. Air drying kinetics of potato cylinders. *Drying Technology*, 1996, 14(9): 2025~2040
- [71]Litchfield, J. B., Okos, M. R.. Moisture diffusivity in pasta during drying. *Journal of Food Engineering*, 1992, 17: 117~142
- [72]Waananen, K. M., Okos, M. R.. Effect of porosity on moisture diffusion during drying of pasta. *Journal of Food Engineering*, 1996, 28: 121~137
- [73]Palipane, K. B., Driscoll, R. H.. Moisture sorption characteristics of in-shell Macadamia Nut. *Journal of Food Engineering*, 1992, 18: 63~76
- [74]Gas, S.. The need for, and practical applications of sorption data. In *Physical Properties of Foods – 2*, ed. R. Jowitte, et al. Elsevier Applied Science, London and New York, 1987: 13~25
- [75]Wang, N., & Brennan, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, 1991,14: 269~287
- [76]Ranken, M. D.. *Handbook of meat product technology*. Blackwell Science Ltd., 2000
- [77]Masken, M., Katatas, S., & Voschinin, A. P. An approach for estimation of critical points of water sorption isotherms of foods. *Drying Technology*, 1998, 16(3-5): 863~876
- [78]Iglesias, H., & Chirife, J.. *A handbook of food isotherms*. New York, 1982: Academic Press
- [79]Lazarides, H. N.. Sorption isotherm characteristics of an intermediate moisture meat product. *Lebensmittel Wissenschaft Technologie*,1992, 23(5): 418~421
- [80]Lazarides, H. N.. Application of the transformed GAB equation to delineate moisture sorption behaviour of an intermediate moisture meat product. *Lebensmittel Wissenschaft Technologie*, 1991, 24(4): 310~314
- [81]Clemente, G, Bon, J., García-Pascual, P., Monleón, A., Mulet, A.. Sorption isotherm of pork muscle Biceps femories at different temperaturea. *Proceedings of the 13th International Drying Symposium(IDS'2002)*, Beijing, PR China
- [82]Lomauro, C. J., Bakshi, A. S., & Labuza, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I. Fruit, Vegetables and meat products. *Lebensmittel Wissenschaft Technologie*, 1985, 18: 111~115
- [83]Bizot, H., Multon, J. L.. Méthode de Référence Pour la Mesure de l'activité de l'eau dans les Produits Alimentaires. *Annales de Technologie Agricole*, 1978, 27(2): 441~449
- [84]Kouhila, M., Belghit, A., Boutaleb, B. C.. Experimental determination of the isotherms of sorption of Aromatic Herbs: Sage and Verbena. *Proceedings of the 12th International Drying Sympposium IDS; Holland*, 2000
- [85]McLaren, A. D., & Rowen, J. W.. Sorption of water vapour by proteins and polymers: a review. *Journal of Polymer Science*, 1951, 57: 289~324
- [86]Masuzawa, M., & Sterling, C.. Gel-water relationships in hydrophilic polymers: thermodynamics of sorption of water vapour. *Journal of Polymer Science*, 1968, 12: 2023
- [87]Iglesias, H. A., Chirife, J., & Lombardi, J. L.. Comparison of water vapour sorption by sugar root components. *Journal of Food Technology*, 1975, 10: 385
- [88]Kouhila, M., Belghit, A., Daguene, M., Boutaleb, B. C.. Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia officinalis*) and verbena (*Lippia Citriodora*).

- Journal of Food Engineering, 2001, 47: 281~287
- [89]Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Kechaou, N.. Experimental study and modeling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*).. Journal of Food Engineering (in press), 2002a
- [90]Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Kechaou, N.. Experimental study and modeling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*), Journal of Food Engineering, 2002, 55(3): 9~15
- [91]Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M., and Lahsasni, S.. Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus globules. *Drying Technology*, 2002, 20(10): 2027~2039
- [92]Van Den Berg, C., & Bruin, S.. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In *Water Activity: Influence on Food Quality*, ed. L. B. Rockland & G. F. Stewart. Academic Press, New York, 1981: 45
- [93]Chen, C. S.. Equilibrium moisture curves for biological materials. *Transition*, ASAE, 1971, 14: 924~926
- [94]Oswin, C. R.. The kinetics of packing life. III. The isotherm. *Journal of Chemistry Industry*, 1946, 65: 419~423
- [95]Chung, D. S. & Pfost, H. B.. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Part I. Heat and free energy changes of adsorption and desorption. *Transition*, ASAE, 10, 549~551
- [96]Henderson, S. M.. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, 1952, 33: 29~32.
- [97]Halsy, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. *Journal of Chemistry Physical*, 1948, 16: 931~938
- [98]Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E.. Adsorption of gases in multimolecular layer. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1938, 60: 309~328
- [99]Álvarez-Reyes, A., Acosta-Esquivarosa, J., Sordo-Martínez, L., and Concepción-Martínez.. Experimental determination and modeling of sorption isotherms of *Erythrina fusca* Lour Bark. *Drying Technology*, 2004, 22(7): 1755~1765
- [100]Sanni, L. O., Kolawole, A. G., Akingbala, J. O., and Kuye, A.. Effent of drying methods on moisture sorption isotherms of fufu at three temperatures. *Drying Technology*, 1999, 17(1&2): 285~197
- [101]Wang, N., & Brennan, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, 1991, 14: 269~287
- [102]Labuza, T. P. *Moisture Sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use*; AACC, Tt Paul, Minnesota, 1984
- [103]Konishi, Y., Kobayashi, M.. Characteristic innovation of a food drying process revealed by the physicochemical analysis of dehydration dynamics. *Journal of Food Engineering*, 2003, 59: 277~283
- [104]Corzo, O., Bracho, N.. Shrinkage of osmotically dehydrated sardine sheets at changing moisture contents. *Journal of Food Engineering*, 2004, 65: 333~339
- [105]Suzuki, K., Kubota, K., Hasegawa, T., & Hosaka, H.. Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, 1976, 41: 1189~1193
- [106]Clemente, G., Bon, J., Carcel, J. A., Garcia-Pascual, P., & Mulet, A.. Meat shrinkage during. In J.

- Welti-Chanes, G.V. Barbosa-Canovas, & J. M. Aguilera (Eds), Proceedings of the eighth international congress on engineering and food, 2001, II: 1225~1229
- [107]马俪珍,蒋福虎,刘会平,刘润生.烤羊肉加工工艺.肉类研究,1999(3):26~27
- [108]周光宏,赵改名,彭曾起.我国传统腌腊肉制品存在的问题及对策.肉类研究,2003(1):3~7
- [109]刘伯钧.肉品加工中的烘烤.肉类研究,2003(4):18~19

致 谢

本论文是在导师崔建云教授的指导下完成的。从论文的选题、试验设计及实施到论文的撰写和修改都浸透着崔老师的心血。崔老师严谨的治学态度，以身作则的育人方式，豁达平和的人生观和正直善良的为人态度时时给我以熏陶，使我受益终生。值此论文完成之际，谨向辛勤培育和教导我的老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

在论文的实施过程中，任发政老师、陈尚武老师和葛克山老师在论文的立题、方案设计方面以及之后的实验过程中给了我很多宝贵的指导和建议，这种无私的教书育人态度我会永远感怀在心！

感谢罗瑀、刘昌蓉、王也、胡长利和唐雨田在我的试验过程中提供的帮助。此外，还要感谢实验室其他的师兄、师姐、师弟和师妹以及实验员席利明、董小娜在我读研期间和论文写作期间提供的无私帮助。大家不仅在学习生活中给予我极大的关怀，而且让我在一个温暖、和睦、团结、向上的集体中度过了令人难忘的开心的日子。

感谢我的父母多年来对我的养育，感谢他们对我学习的支持和鼓励，对我生活的关心，使我能安心学业，勇敢面对学习和生活中的每一次挑战，在求学的道路上不断前进。我的爸爸、妈妈和姐姐是我积极向上的动力和坚强的后盾，没有他们的支持，我无法走到今天。

最后，感谢中国农业大学、感谢食品学院三年来对我的培养！感谢每一位老师的辛勤教导，感谢每一位同学的真诚帮助。我将用这份人生中宝贵的经历和财富去创造更加美好的明天！

作者简介

张厚军，男，汉族，湖北省公安人，1980年11月生。

1999.9~2003.7 就读于武汉工业学院食品学院，获工学学士学位；

2003年7月至今就读于中国农业大学食品学院攻读硕士学位，获工学硕士学位。

参加课题：

1 在读期间，参加了科技部“十五”科技攻关课题《中国传统肉制品现代加工技术、设备与产业化示范》，课题编号 NO.2001BA501A24

发表论文：

1 张厚军，崔建云，罗璐. 腊肉分段烘烤工艺的试验研究[J].肉类研究，2005(10):29-31

2 张厚军，崔建云，任发政，罗璐. 模拟猪通脊肉脱水动力学[J].农业机械学报，已接收

3 罗璐，崔建云，陈尚武，任发政，张厚军. 添加木瓜蛋白酶对腊肉风味的影响研究[J].肉类研究，2005(10):25-28