



DRYING THEORY AND TECHNOLOGY OF
AGRICULTURAL PRODUCTS

农产品 干燥理论与技术

郑先哲 汪 春 贾富国 / 编著 夏吉庆 / 主审



郑先哲 汪 春 贾富国 夏吉庆 编著
主 审

DRYING THEORY AND TECHNOLOGY OF
AGRICULTURAL PRODUCTS

农产品 干燥理论与技术

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

农产品干燥理论与技术/郑先哲等编著. —北京: 中国轻工业出版社, 2009.1

ISBN 978-7-5019-6547-2

I. 农… II. 郑… III. 农产品-干燥 IV. S375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 116452 号

责任编辑: 张 靓 责任终审: 唐是雯 封面设计: 灵思舞意·刘微

版式设计: 王超男 责任校对: 杨 琳 责任监印: 胡 兵 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.25

字 数: 307 千字

书 号: ISBN 978-7-5019-6547-2/TS·3818 定价: 32.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119845 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

70109K1X101ZBW

前 言

干燥是农产品收获后的必要处理环节,因干燥过程占能耗总量比率增加,以及消费者对干燥产品质量要求不断提高,对农产品干燥工艺的改进和新干燥技术的需求变得很迫切了。

在农产品加工的学术界和产业界已有共识,农产品干燥是个复杂的传热、传质过程,其间伴有体积收缩、成分降解等物理、化学过程,如何正确控制农产品干燥过程,提出合理干燥工艺参数及流程,从而实现对农产品高效率、高品质的干燥加工,这是农产品加工的研究部门和企业所关心的问题。本书第1章和第2章分别提出了农产品干燥特性和干燥条件对农产品品质的影响,是分析农产品干燥过程及机理,提出合理干燥工艺的基础,有助于设计出节能、高效的干燥设备。本书的第3章以干燥设备为主线,介绍谷物干燥设备的分类、原理及谷物干燥工艺。脱水果蔬生产是农产品增值加工的一个主要方面,本书的第4章系统地介绍了常用的果蔬脱水加工设备和工艺,可用于指导生产实践。牧草干燥和干花加工是农产品干燥加工的热点方向,第5章和第6章详细介绍这两种新兴农产品的干燥机理、工艺及设备。热泵干燥具有干燥品质好,节省能耗等特点,第7章在阐述热泵干燥原理及设备分类的基础上,重点介绍了新型热泵干燥设备。第8章系统介绍了农产品微波干燥原理、工艺及设备,有助于读者全面地了解微波干燥技术在农产品脱水中的最新应用。第9章从实用的角度介绍农产品真空冷冻干燥的原理、工艺及设备,为读者提供了可行的农产品真空冷冻干燥技术。第10章介绍三种与干燥有关的农产品加工新技术。

本书第1章和第3章由黑龙江八一农垦大学的汪春教授编写,第2章由东北农业大学的王忠江博士编写,第4章由东北农业大学的刘成海博士编写,第7章由东北农业大学贾富国副教授编写,东北农业大学的郑先哲教授编写了其余部分,并进行了全书统稿工作。全书由东北农业大学夏吉庆研究员审定。丁凝冶和时玉强及其它同志为本书的插图及稿件整理做了大量的工作,在此谨表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,时间仓促,谬误之处请批评指正。

编者

2007.12

目 录

1 农产品干燥特性	1
1.1 概述	1
1.2 农产品物理特性指标	1
1.3 农产品干燥过程中传热、传质参数	9
1.4 干燥动力学特性	20
2 干燥过程对农产品品质影响	30
2.1 概述	30
2.2 干燥过程中农产品品质指标	31
2.3 干燥过程对农产品颜色的影响	42
2.4 农产品干燥过程中的质构特性变化	46
3 谷物干燥技术	52
3.1 概述	52
3.2 谷物干燥设备的类型	55
3.3 稻谷干燥	69
3.4 谷物干燥条件	74
4 果蔬脱水技术	77
4.1 概述	77
4.2 果蔬脱水前处理	78
4.3 果蔬干燥方法	81
4.4 果蔬干制后的处理工艺	92
4.5 几种果蔬干制方法	95
5 苜蓿干燥技术	97
5.1 概述	97
5.2 苜蓿干燥特性研究	99
5.3 苜蓿干燥方法	111
5.4 苜蓿干燥设备	114
5.5 干草品质	118
6 鲜花干燥技术	131
6.1 概述	131
6.2 鲜花干燥原理与特性	134
6.3 鲜花干制的预处理	135

6.4	鲜花干燥方法	139
6.5	鲜花干制工艺实例	146
7	热泵技术在农产品干燥中的应用	149
7.1	概述	149
7.2	热泵干燥特点	151
7.3	热泵干燥机的分类	152
7.4	热泵干燥技术在农产品脱水中的应用	153
7.5	热泵干燥系统	155
7.6	新型热泵设备	161
8	微波技术在农产品干燥中的应用	167
8.1	概述	167
8.2	微波干燥理论	168
8.3	影响农产品介电特性的因素	171
8.4	微波干燥工艺	178
8.5	微波干燥产品的质量	183
8.6	微波干燥设备	185
9	农产品冷冻干燥技术	189
9.1	概述	190
9.2	冷冻干燥原理	192
9.3	影响农产品冷冻干燥过程的因素	196
9.4	冷冻干燥设备	204
9.5	典型冻干产品的生产工艺	210
9.6	冻干产品的质量标准及控制	214
10	农产品干燥新技术	217
10.1	概述	217
10.2	超高温蒸汽干燥技术	217
10.3	农产品成分包埋技术	220
10.4	农产品膨化干燥技术	222
	参考文献	231



1 农产品干燥特性

1.1 概述

农产品通常包括粮、棉、油、林、牧、果、菌等大宗农业产品及相应的副产品，如粮食、蔬菜、水果、畜产品、禽产品、调料、油类、蜂产品、水产品、食用菌类、山野菜、林副产品等，也包括用食品添加剂和品质改良剂等辅料生产的产品，纤维类经济作物、淀粉类经济作物以及用于生活消费的产品，如棉花、蚕丝、动物毛皮、花卉等产品，此外还应包括地区性的土特产品等。

农业生产主要包括两大类：一类是种植养殖业，即农产品生产业；另一类是农产品加工业，即通过各种工程措施将第一类生产出的原料加工成供人们吃、穿、用的成品或半成品。农产品加工业是我国国民经済的一个重要组成部分，它是农业生产的继续、深化和发展，是农业生产与市场连接的纽带，是农产品商品化不可缺少的重要环节。农产品的贮藏保鲜和加工是降低农产品的产后损失，增加农产品经济价值，提高农产品市场竞争力的有效措施。世界发达国家都将农产品加工业摆在农业的首要位置，足以说明其重要地位。随着市场经济的发展，农产品的深度加工和综合利用显得越来越重要，这是我国经济发展的客观要求和必然趋势。

干燥是农产品贮藏的重要手段，也是一项重要的农产品加工技术。农产品种类繁多，而且绝大多数农产品加工都与干燥密切相关。人们认识到，可长期贮存的腌制、熏制食品和罐头食品具有含致癌因素或营养素严重损失的缺点，而经脱水的农产品具有无污染、方便和有益于健康的特点。

本章提出的农产品干燥特性指标，是分析农产品干燥过程及机理，提出合理干燥工艺的基础，有助于设计出节能、高效的干燥设备。

1.2 农产品物理特性指标

农产品的物理特性包括质量-体积-面积、形态、流变和表面等方面的指标。本节内容主要涉及质量-体积-面积方面的指标，是导出其它特性指标的基础参数，确定产品具体物理性质和品质指标，可用于设计加工过程参数和设备。如在谷物干燥机、粮仓的设计计算中需要了解谷物的湿热特性和密度参数等指标。

1.2.1 基本特性参数

1.2.1.1 密度

密度是物料重要的物理特性之一，定义为物料的质量与其体积的比值，广泛用于过程计算和确定产品品质。在多数情况下，农产品内部包含多相组分，如固体、液体和气体（空气），简单的密度定义不足以说明物料质量与其体积的关系。在农产品加工过程计算中，常用到的物料密度有以下四种：

真实密度：真实密度就是物料质量与其实际体积的比值，实际体积就是不包括粒状食品之间空隙的体积。

颗粒密度：指单个颗粒单位体积的密度。颗粒内部的空隙影响颗粒密度。当把颗粒置于气体或液体中按照排气（或排水量）测量颗粒密度时，必须保证气体（或液体）不会渗入颗粒内部空隙中。不同种类谷物颗粒密度相差很多，而同一种谷物的不同类别之间的差异小一些。颗粒密度也和物料的含水量紧密相关，所以测量颗粒密度时也需要了解其相应含水量。

表观密度：是指物料的质量与包含孔隙在内的体积的比值。如果敲打充填好物料的容器，直至获得最紧密状态，则此时的表观密度称为最终表观密度或称为充填密度。充填方法和容器尺寸都会影响检测结果。表观密度的倒数称为表观比体积。

体密度：是指物料在一定体积内压紧或者堆积时的密度。体密度与物料的形状、尺寸和个体的表面特性有关。粒状食品或农产品的体密度检测方法是将样品倒入已知尺寸的容器中，使其从一定高度落下受到冲击振实。该指标常用于表征农产品贮运、干燥、包装时体积变化。如果蔬菜常常装入大容量包装中贮存，这些包装用搬运机搬运，堆积到拖车或卡车上。包装内的体密度随单个水果的密度、水果大小分布和充填方法的不同而不同。体密度受到粒度分布情况和颗粒形状的影响。

在 2.2.1 节将详细介绍干燥过程对各种密度的影响。

1.2.1.2 球形度

将颗粒状的农产品外形与球形比较，定义为球形度（S）：

$$S = \frac{d_e}{d_{all}} \quad (1-1)$$

在式（1-1）中， d_e 是与籽粒体积相等的球的直径（等效直径）， d_{all} 是当量球的直径。干燥时谷物表层球形度影响传热和传质过程。

1.2.1.3 内摩擦角和响应角

谷物的摩擦特性用内摩擦角和响应角表示，这两个参数都随水分增加而呈非线性增加。

图 1-1 列出了四种谷物的响应角，该指标反映谷物在干燥设备内的可流



动性。

1.2.1.4 湿物料比热容

湿物料比热容 (c) 是通过谷物中的干物质和其中包含的水分的平均比热容计算而得的。

如果已知谷物含水率 (M) 和温度 (t)，谷物的比热容可以通过下式估算：

$$c=c_s+AM^a+Bt^b \quad (1-2)$$

式中， A 、 a 、 B 和 b 是经验参数， c_s 是常数，与物料种类有关，具体值列于表 1-1 中。

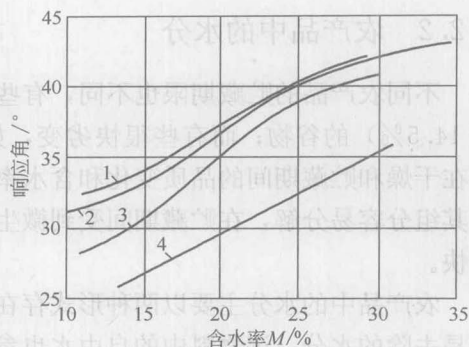


图 1-1 谷物响应角与含水率的关系

1—带壳玉米 2—大麦 3—小麦 4—草籽

表 1-1 部分谷物的比热容

谷物	取值范围		比热容 /[kJ/(kg·K)]	相关性方程
	M/%	t/°C		
小麦	0~16	2~20	1.21~1.76	$c=1.21+0.035M$
	1.3~17.5	0	1.3~1.87	$c=1.1+0.043M$
	0~20	20~70	1.13~2.70	$c=0.075+0.046M+0.0084t$
	0.7~20.3	10~32	1.45~2.19	$c=1.4+0.041M$
	0~30	0~80	1.48~2.38	$c_0=2.05g_N+1.42g_s+1.34g_c$ $c=(c_0+0.00168t)(1-M)+4.19M$
玉米	0.9~30.2	10~30	1.53~2.46	$c=1.47+0.036M$
	0.60	15~60	0.9~3.02	$c=1.37+0.027M$
	0~40	0~80	1.33~3.49	$c=1.33+2.65M^{0.98}+0.01t^{0.80}$
稻谷	10.2~17	0	1.58~1.88	$c=1.12+0.045M$
	12~20	5	1.66~1.98	$c=0.92+0.054M$
	0~30	0~60	1.44~2.33	$c_0=2.05g_N+1.42g_s+1.34g_c$ $c=(c_0+0.00168t)(1-M)+4.19M$
黑麦	0~20	0~60	1.48~2.10	$c_0=2.05g_N+1.42g_s+1.34g_c$ $c=(c_0+0.00168t)(1-M)+4.19M$
燕麦	11.7~17.8	0	1.66~1.86	$c=1.28+0.33M$
大豆	0~20	0~50	1.63~2.21	$c_0=2.05g_N+1.42g_s+1.34g_c$
				$c=(c_0+0.00168t)(1-M)+4.19M$

1.2.1.5 热传导

物料的热传导特性主要受含水率和温度影响。物料中的水分比其干物质有更高的热传导值，对物料的热传导值有很大的影响。如果已知谷物含水率 (M) 和温度 (t)，谷物的热传导值 Q (kJ) 可以通过下式估算：

$$Q=\left(A+\frac{t}{100}\right)\left(B-\frac{1}{M+1}\right)+C \quad (1-3)$$

式中， A 、 B 、 C 是与物料种类有关的常数，对于玉米， $A=0.5$ ， $B=1.1$ ， $C=0.14$ 。

1.2.2 农产品中的水分

不同农产品的贮藏期限也不同,有些可以长期贮藏,如达到安全含水率(低于14.5%)的谷物;而有些很快劣变,如新鲜果蔬,尤其是刚采摘的浆果。物料在干燥和贮藏期间的品质变化和含水率直接相关,含水率高的农产品在干燥期间其组分容易分解,在贮藏期间受到微生物的破坏几率高,因此质量劣变的速率加快。

农产品中的水分主要以两种形式存在:自由水和束缚水。自由水是在干燥中容易去除的水分。湿物料中的自由水也参与化学反应和酶反应过程,可导致产品品质劣变。农产品中内含的束缚水,其水分子具有极性结构,液态时呈部分有序排列,氢键束缚不断形成和断开,相互间有很高的亲和力。束缚水与物料中其它成分(干物质)紧密结合,有很强的结合能,与含水率呈函数关系,并随着物料含水率下降,结合能呈幂函数增加,在干燥时去除难度大,容易使物料产生裂纹、塌陷等品质劣变现象。

以谷物为例,其中的自由水和束缚水吸附在细胞间的毛细管中,因吸附力作用形成半月面形的液面形状,而所受的重力和表面张力的影响可以忽略。如果毛细管的直径大于0.002mm,半月面以上饱和水蒸气分压基本上与自由水上的水蒸气压相同。毛细管直径小于0.002mm时,由于毛细管引力作用,产生低蒸汽压。运用 Kelvin 方程计算毛细管内水面上蒸汽压(p_c),如式(1-4)所示,式中 σ 是表层张力, r_c 是毛细管半径, ρ 是水的密度, p_s 是自由表面蒸汽压的函数。

$$p_c = p_s \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma}{RT \cdot r_c \rho}\right) \quad (1-4)$$

1.2.2.1 吸湿和解吸等温线

吸湿等温线是在一定的大气压力和温度条件下,吸湿性物料因吸湿达到的平衡含水率与大气相对湿度的关系曲线;解吸等温线是在一定的大气压和温度条件下,吸湿性物料因解吸达到的平衡含水率与大气相对湿度的关系曲线。

在干燥过程中,要考虑物料的吸湿和解吸能力。湿物料表层的水蒸气分压和周围环境中水蒸气压的差值是正数时,是颗粒表层向周围空气蒸发水分,称之为解吸。当物料的水分降到某值以下时(每种物料都不同),上述提及的水蒸气分压的差值变成负数,引起水分向物料方向传递,称之为吸附。

等温线常用于确定食品在贮藏过程中的稳定性。在给定水分和温度的情况下,根据等温线确定水分状态和移动趋势;计算低水分时物料解吸所需能量;并可估计不同的化学和微生物劣变反应的速率。

在介绍水分活度之前,首先了解农产品在吸附和解吸过程得到平衡水分状态的差异,如图1-2所示。在同一温度和相对湿度下,物料对应的含水率都是解吸



大于吸湿,表明吸收到物料中的水分不能完全被非水组分束缚(结合),也就是说,脱水物料不能完全复水还原,这是由于生物性物料在脱水过程中,一些化学反应可能发生,尤其是在处理热敏性成分(物料)时,这可能破坏细胞质膜,导致在复水时细胞间和细胞内部的成分逸出。因此,复水过程中,细胞持水机理会进一步改

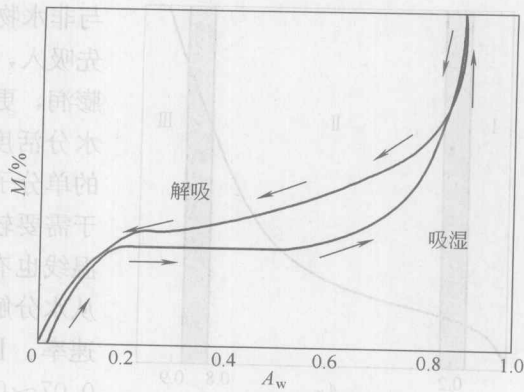


图 1-2 吸湿等温线滞后现象

变。对复水的物料块压缩至原有体积的 50%,挤出其中的液体,计算失水量,这样确定物料的持水能力。干燥时物料内部的细胞结构和其它物理特性(如体积膨胀)发生可逆和不可逆变化。不可逆变化影响细胞持水能力,影响物料的吸湿和解吸特性。这有助于分析干燥农产品(如脱水果蔬)复水特性。有几种假设解释吸湿等温线“滞后性”的现象,最好的理论是墨水瓶理论。根据这个理论,物料内部有大直径和小直径瓶颈结合体构成的多孔结构,使得毛细管多孔体上方的相对湿度降低。在吸湿过程中,毛细管中不能完全填充水分。这个理论没有对观察到的滞后现象给出满意解释。目前的理论表明,滞后现象另外的原因可能是分子收缩减少了颗粒吸湿表面积。

1.2.2.2 水分活度

作为吸湿性物料,农产品中的水分束缚在固体晶格中,在相同的温度下,水蒸气的分压力是低于纯水的。吸湿性物料表面的水蒸气压力与相同温度下纯水水蒸气压力的比值,称为该物料的水分活度 A_w ,如图 1-3 所示。在干燥过程中,吸湿平衡水分决定在特定干燥条件下物料的最终水分,这些数据也用于估算干燥时间和能耗。在已知物料初始含水率的情况下,生物性物料的吸湿等温线有助于确定解吸的情况。

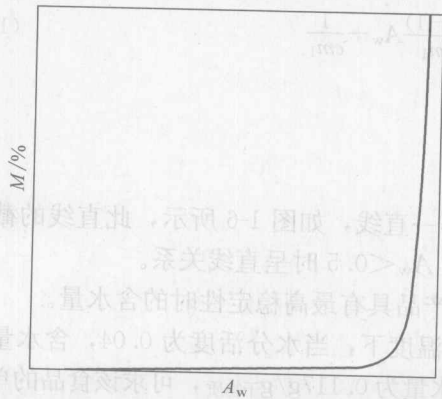


图 1-3 吸湿性物料 A_w 曲线

在等温吸湿线中低含水量范围内,含水量稍增加就会导致水分活度的大幅度增加。把低含水量区域内的曲线放大,呈一反 S 形曲线。根据水分活度与含水量的关系可将此曲线分成三个区域,如图 1-4 所示。

I 区: $A_w = 0 \sim 0.25$, 含水量为 $0 \sim 0.07 \text{ g/g}$ 干物质,这是吸湿性物料中

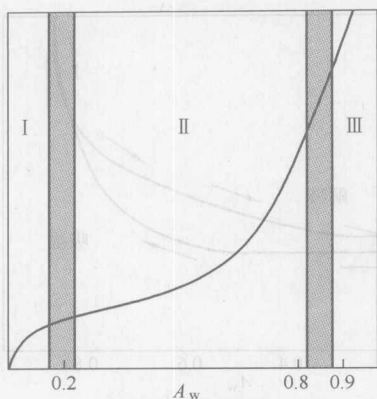


图 1-4 物料 A_w 曲线特性区域

与非水物质结合最为紧密的水，吸湿时最先吸入，干燥时最后排除，不能使干物质膨润，更不能起到溶解的作用，I 区最高水分活度对应的含水量就是吸湿性物料中的单分子层水。水分活度低于 0.25 时，由于需要较多能量，水分难于解吸。吸湿等温线也有助于确定在给定的干燥条件下，从水分解吸驱动力方面，可达到最大干燥速率。II 区： $A_w=0.25\sim0.80$ ，含水量为 $0.07\sim0.32\text{g/g}$ 干物质，该部分水实际上是多层水，起到膨润和部分溶解的作用，加

速化学反应的速率。III 区： $A_w=0.80\sim0.99$ ，在水分活度大于 0.8 的情况下，束缚能低，水分（称为自由水）解吸相对容易。含水量大于 0.40g/g 干物质，起到溶解和稀释作用，冻结时可以结冰。

一般说来，大多数吸湿性物料中的等温吸湿线都呈 S 形，而含有大量糖分及可溶性小分子但不富含高聚物的水果、咖啡提取物的等温吸湿线呈 J 形。

物料的等温吸湿线与温度有关，由于水分活度随温度的升高而增大，所以同一物料在不同温度下具有不同的等温吸湿线，如图 1-5 所示。

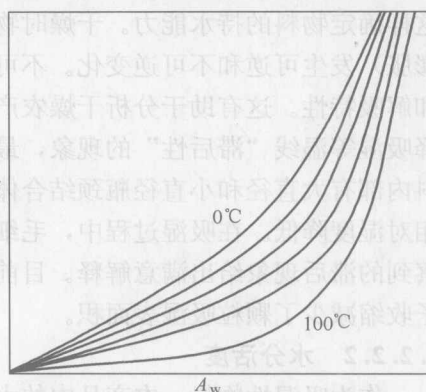


图 1-5 吸湿性物料 A_w 与温度的关系

1.2.2.3 吸湿物料的等温吸湿线方程

农产品等一般吸湿性物料的等温吸湿线可用 BET 式 (1-5) 表示：

$$\frac{A_w}{(1-A_w)m} = \frac{(c-1)}{cm_1} A_w + \frac{1}{cm_1} \quad (1-5)$$

式中 c ——与吸附热有关的常数

m ——样品的含水量， g/g 干物质

m_1 ——BET 单层值，即单分子层值

利用 $A_w/(1-A_w)$ 对 A_w 作图，可得一直线，如图 1-6 所示，此直线的截距为 $1/(m_1 c)$ ，斜率为 $-(c-1)/(m_1 c)$ ，当 $A_w < 0.5$ 时呈直线关系。

根据 BET 单层值可以准确推测干燥产品具有最高稳定性时的含水量。

例如，在某一吸湿性物料中，在一定温度下，当水分活度为 0.04，含水量为 0.0405g/g 干物质；当水分活度为 0.32，含水量为 0.117g/g 干物质，可求该食品的单分子层水含量 $m_1=0.0889\text{g/g}$ 。图 1-7 是马铃薯在不同干燥方式中的 BET 曲线。

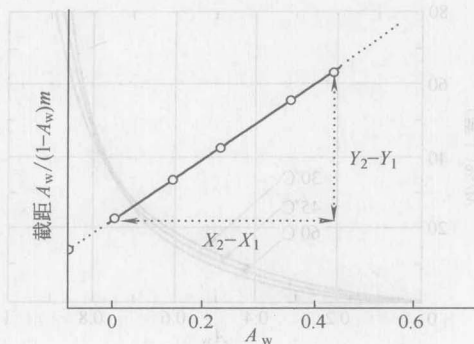


图 1-6 BET 单层值的计算

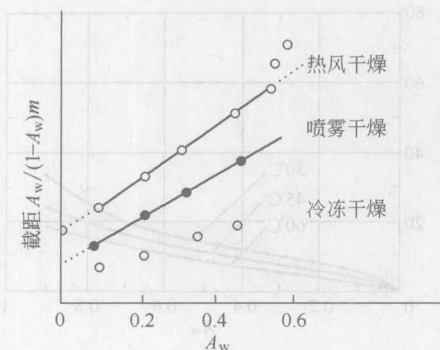


图 1-7 不同干燥方法的马铃薯 BET 曲线

吸湿性物料中的 A_w 值是水分和温度的函数，Clausius-Clapeyron 方程式 (1-6) 较好地说明了温度对水分活度 A_w 的影响。表 1-2 和表 1-3 分别给出了几种水果和果粉在不同含水率和温度下的水分活度值，通常情况是，随着温度升高，水分活度值增加，水分吸收量减少。李子干的吸湿平衡典型曲线如图 1-8 所示，是在不同温度下的吸湿等温线，李子干水分活度随着水分减少而降低。

$$\left[\frac{\partial \ln A_w}{\partial (1/T)} \right] = -\frac{\Delta H}{R} \quad (1-6)$$

式中 ΔH 是吸湿热。影响水果吸湿等温线的其它因素有：化学组成、物理结构和预处理方式。几种水果的吸湿热与水分关系曲线见图 1-9，除了菠萝无显著变化，其余三种水果的吸湿热均随含水量的增加有不同程度的下降。

图 1-10 和图 1-11 分别是马铃薯和葡萄干平衡水分和水分活度的关系曲线。马铃薯和葡萄的平衡含水率随水分活度逐渐增加。随着温度升高，马铃薯的平衡水分下降，而对于葡萄干的平衡水分，先是随着温度升高而减少，当水分活度超过 0.7~0.8 临界范围后，随着温度升高而增加。

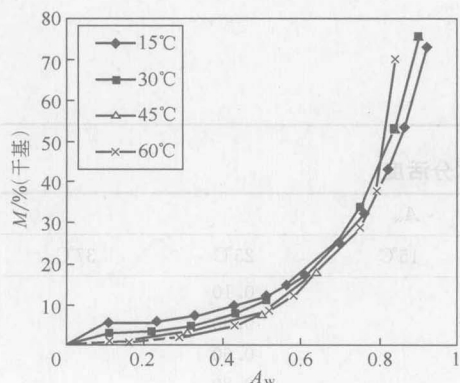


图 1-8 不同温度下李子干吸湿平衡曲线

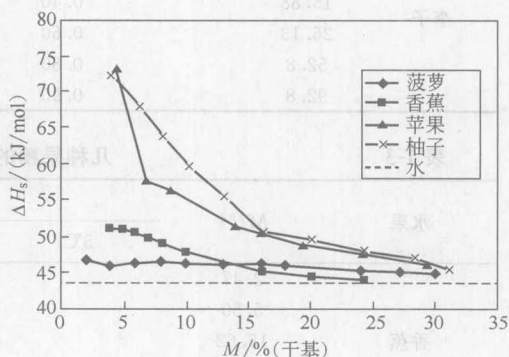


图 1-9 几种水果的吸湿热与水分关系曲线

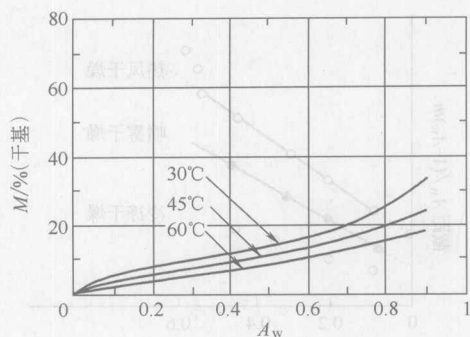


图 1-10 马铃薯 A_w 和 M 关系曲线

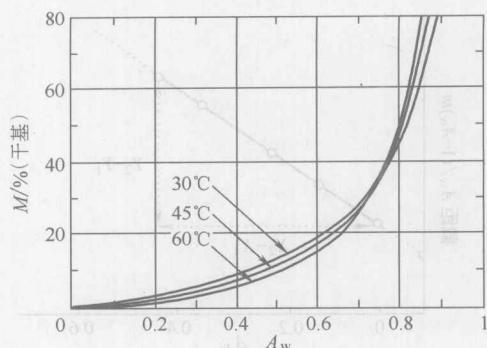


图 1-11 葡萄干 A_w 和 M 的关系曲线

表 1-2 几种水果的水分活度

水果	M/%	A_w					
		5℃	20℃	25℃	30℃	45℃	60℃
杏	7.75		0.10				
	14.79		0.35				
	24.2		0.60				
	60.2		0.90				
葡萄	10	0.46		0.46		0.50	0.66
	15	0.52		0.52		0.59	0.71
	20	0.60		0.60		0.65	0.75
桃	10		0.40		0.40		
	15		0.50		0.50		
	20		0.60		0.60		
柿子	6.25				0.25		
	9.01				0.40		
	24.7				0.70		
李子	6.10		0.10				
	12.8		0.30				
	15.88		0.40				
	26.13		0.60				
	52.8		0.80				
	92.8		0.90				

表 1-3 几种果粉的水分活度

水果	$M/\%$	A_w			
		5℃	15℃	25℃	37℃
香蕉	2.47			0.10	
	5.50			0.30	
	15.62			0.60	
	26.89			0.80	
	34.93			0.90	
蓝莓	2.06	0.11			



续表

水果	M/%	A _w			
		5℃	15℃	25℃	37℃
蓝莓	6.78	0.34			
	19.54	0.65			
	29.34	0.76			
	56.17	0.88			
	2.13		0.11		
	6.82		0.33		
	17.00		0.61		
	29.42		0.76		
	49.20		0.86		
	2.18			0.11	
	6.81			0.33	
	15.34			0.58	
	29.23			0.75	
	45.73			0.84	
	0.09			0.10	
芒果	0.34			0.30	
	2.22			0.70	
	6.82			0.80	
	23.0			0.90	
	0.42				0.32
	1.08				0.54
	4.13				0.75
	17.94				0.79
	44.35				0.91
	3.53	0.11			
	7.64	0.34			
	23.57	0.65			
	33.69	0.76			
	70.91	0.88			
	3.68		0.11		
草莓	7.75		0.33		
	18.87		0.61		
	34.03		0.76		
	64.13		0.86		
	2.45			0.11	
	7.41			0.33	
	17.82			0.58	
	34.45			0.75	
	55.52			0.84	
					0.11
					0.33
					0.58
					0.75
					0.84

1.3 农产品干燥过程中传热、传质参数

与农产品有关的热力学和传递特性的参数有：水分扩散系数、有效热导率、

空气边界传质系数、传热系数、干燥常数、物料平衡水分。

干燥过程中，物料中的水分扩散是一种复杂的过程，它包括分子扩散，毛细管流动，克努森流动，水动力流动或表面扩散现象。如果把所有这些现象结合在一起，根据 Fick's 第二定律，组分分布均匀物料（指理想情况）有效扩散系数可定义为：

$$\partial m / \partial t = D \nabla^2 m \tag{1-7}$$

式中 m ——物料含水量，kg/kg干物质

D ——有效扩散率，m²/s

t ——时间，s

非均匀介质中的水分传递可以依据 Fick's 定律在均匀物料中的应用来进行分析，通过有效扩散率可说明物料的非均匀性。

式（1-7）表明了物料水分分布随时间的变化，即描述了物料内水分的移动情况。有效扩散率通常用来计算干燥速率或吸湿速率。表 1-4 是一些物料的有效扩散率的数值。

表 1-4 农产品和食品物料的有效水分扩散率

物料	含水量 /(kg/kg干物质)	温度/℃	扩散率/(m ² /s)
苜蓿茎	<3.7	26	2.6E-12~2.6E-09
苹果	0.12	60	6.5E-12~1.2E-10
	0.15~7.00	30~76	1.2E-10~2.6E-10
鳄梨		31~56	1.1E-10~3.3E-10
甜菜		65	1.5E-09
饼干	0.10~0.65	20~100	9.4E-10~9.7E-08
面包	0.10~0.70	20~100	2.5E-09~5.5E-07
胡萝卜	0.03~11.6	42~80	9.0E-10~3.3E-09
玉米	0.05~0.23	40	1.0E-12~1.0E-10
	0.19~0.27	36~62	7.2E-11~3.3E-10
鱼肉	0.05~0.30	30	8.1E-11~3.4E-10
大蒜	0.20~1.60	22~58	1.1E-11~2.0E-10
牛奶泡沫	0.20	40	1.1E-09
脱脂牛奶	0.25~0.80	30~70	1.5E-11~2.5E-10
松饼	0.10~0.65	20~100	8.4E-10~1.5E-07
洋葱	0.05~18.7	47~81	7.0E-10~4.9E-09
粗粒小麦粉	0.01~0.25	40~125	3.0E-13~1.5E-10
玉米	0.10~0.40	40~80	5.0E-11~1.3E-10
硬质小麦	0.16~0.35	50~90	2.5E-12~5.6E-11
胡椒(绿色)	0.04~16.2	47~81	5.0E-10~9.2E-09
意大利辣香肠	0.19	12	4.7E-11~5.7E-11
马铃薯	0.60	54	2.6E-10
	<4.00	65	4.0E-10
	0.15~3.50	65	1.7E-09
	0.01~7.20	39~82	5.0E-11~2.7E-09
大米	0.18~0.36	60	1.3E-11~2.3E-11



续表

物料	含水量 /(kg/kg干物质)	温度/℃	扩散率/(m ² /s)
	0.28~0.64	40~56	1.0E-11~6.9E-11
大豆(脱脂)	0.05	30	2.0E-12~5.4E-12
淀粉(凝胶)	0.10~0.30	25	1.0E-12~2.3E-11
	0.20~3.00	30~50	1.0E-10~1.2E-09
	0.75	25~140	1.0E-10~1.5E-09
淀粉(粒状)	0.10~0.50	25~140	5.0E-10~3.0E-09
糖用甜菜	2.50~3.60	40~80	4.0E-10~1.3E-09
木薯块根	0.16~1.95	97 ³	9.0E-10
火鸡	0.04	22	8.0E-15
小麦	0.12~0.30	21~80	6.9E-12~2.8E-10
	0.13~0.20	20	3.3E-10~3.7E-09

食品扩散率的变化范围是 $10^{-13} \sim 10^{-6}$ ，80%的食品物料扩散率的变化范围是 $10^{-11} \sim 10^{-8}$ ，而 60%的变化范围是 $10^{-9} \sim 10^{-7}$ 。农产品及食品的扩散率比其它物料的扩散率小，这是因为这类物料属于复杂的生物高聚物，对水的束缚更强烈，物料间扩散率的差别小于相同物料中温度或含水量引起的差别。

1.3.1 影响扩散率的因素

物料中的水分扩散率取决于温度和含水量。Arrhenius 方程描述了温度扩散率的相关性，方程如下：

$$D = D_0 \exp(-E/RT) \tag{1-8}$$

式中 D_0 ——Arrhenius 系数，m²/s
 E ——扩散率的活化能，kJ/kmol
 R ——摩尔气体常数，kJ/(kmol·K)
 T ——温度，K

可以把活化能或 Arrhenius 因数看作是水分的经验函数。

对于亲水性强的农产品物料，水分扩散率是温度和物料含水率的递增函数；对于一些亲水能力差的聚合物（如聚甲基丙烯酸酯），随着含水量的增加，水分扩散率减小；对于一些疏水性聚烯烃，水分扩散率与浓度不相关，因此为常数。

表 1-5 是一些表征农产品（及食品）的扩散率的通用方程，它们是温度和含水率的函数。

表 1-5 几种物料扩散率方程

适用的物料	方 程
胡萝卜	$D(M, T) = a_0 \exp(a_1 M) \exp(-a_2/T)$
面包, 饼干	$D(M, T) = a_0 \exp(\sum_{i=1}^3 a_i M^i) \exp(-a_2/T)$
蔬菜	$D(M, T) = a_0 \exp(-a_1/M) \exp(-a_2/T)$