

现代食品加工新技术丛书

# 食品干燥加工技术

董全 黄艾祥 主编



化学工业出版社

·北京·

本书是《现代食品加工新技术丛书》中的一本。

食品干燥加工是食品保藏的重要手段，也是一项重要的食品加工技术。它的发展受到食品生产、研发技术人员的广泛关注。

本书共分十章，分别介绍了食品干燥加工原理、食品厢式和隧道式干燥、食品微波干燥、食品喷雾干燥、食品真空干燥、食品冷冻干燥、食品渗透干燥、干制品的包装和储运、食品干燥加工过程的 HACCP 和干制品质量标准与质量检验。

为了保障本书的实用性和指导性，各种干燥技术都详述了原理、工艺、设备选择和操作，并且提供了丰富的生产实例。

本书可供食品科研、生产部门的研究人员和工程技术人员阅读，也可供高等院校食品科学与工程、食品质量与安全及相关专业的广大师生教学时的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

食品干燥加工技术/董全, 黄艾祥主编. —北京: 化学工业出版社, 2007. 3  
(现代食品加工新技术丛书)  
ISBN 978-7-122-00046-0

I. 食… II. ①董…②黄… III. 食品加工-干燥  
IV. TS205. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 029784 号

---

责任编辑: 侯玉周  
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 焦欣渝  
装帧设计: 郑小红

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 15½ 字数 292 千字 2007 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

干燥是食品保藏的重要手段，也是一项重要的食品加工技术。通过干燥技术将食品中的大部分水分除去，达到降低水分活度、抑制微生物的生长和繁殖、延长食品储藏期的目的。食品的种类繁多，而且绝大多数食品的加工都与干燥密切相关。随着科学技术的进步和经济的发展，人们对所食之物的要求日趋复杂化。传统的以保藏为目的的食品加工，满足了人们消费各种动植物食品不受季节和地域限制的愿望，但加工所造成的色、香、味劣变，营养成分和生理活性成分的损失，以及过分依赖添加剂所引起的安全性等问题，日益被消费者所关注和担忧，特别是消费者对饮食快捷化、方便化的迫切需求，使得干制食品逐渐进入了人们的家庭。而冻干食品更具有绿色、方便和健康的特点。

本书从科研、生产和教学实际出发，在参阅国内外相关文献的基础上编写而成。全书共分十章，分别介绍了食品干燥加工原理、食品厢式和隧道式干燥、食品微波干燥、食品喷雾干燥、食品真空干燥、食品冷冻干燥、食品渗透干燥、干制品的包装和储运、食品干燥加工过程的 HACCP 和干制品质量标准与质量检验。本书简明扼要、重点突出，既具有一定的理论性，又具有较强的实践性，可供科研、生产部门的研究人员和工程技术人员阅读，也可供高等院校食品科学与工程、食品质量与安全及相关专业的广大师生参考。

本书由西南大学董全和云南农业大学黄艾祥主编。参加编写的人员分工如下：董全（绪论、第三章、第七章），黄艾祥（第一章），朱文学、黄桂东（第二章、第五章、第九章），桂明英（第六章），白柳（第八章），陈柄灿（第四章），张甫生（第十章）。全书由董全负责统稿。

在编写过程中，得到了西南大学食品科学学院、云南农业大学、河南科技大学食品与生物工程学院、中华全国供销总社昆明食用菌研究所、成都农业科技职业学院以及其他食品生产、科研单位的支持与帮助。西南大学陈宗道教授对本书的编写给予了悉心的指导并拨冗审稿。在此，谨向所有为本书的编写和出版付出辛劳的人们表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免有一些不足和疏漏之处，敬请广大读者批评指正，以便我们今后修订、补充和完善。

编者

2006年11月

此为试读，需要完整PDF请访问：[www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

# 目 录

绪论 .....	1
一、食品的干燥加工 .....	1
二、食品干燥加工的特点 .....	2
三、食品干燥加工的方法 .....	3
四、食品干燥的历史 .....	4
五、食品干燥加工技术的进展 .....	5
参考文献 .....	7
第一章 食品干燥加工原理 .....	8
第一节 食品干燥储藏原理 .....	8
一、食品水分与食品储藏性能 .....	8
二、干制对微生物生长和酶活性的影响 .....	11
三、干制对食品质量的稳定作用 .....	13
第二节 食品干制的基本原理 .....	15
一、干制过程中食品的湿热传递 .....	15
二、干制过程的特性 .....	18
三、影响湿热传递的因素 .....	19
四、食品干制工艺条件的选择 .....	23
第三节 干制过程中食品的主要变化 .....	24
一、干制过程中食品的物理变化 .....	24
二、干制过程中食品的化学变化 .....	25
参考文献 .....	29
第二章 食品厢式和隧道式干燥 .....	30
第一节 食品厢式和隧道式干燥器 .....	30
一、厢式干燥器的结构、工作原理和特点 .....	30
二、食品厢式干燥器的类型 .....	32
三、食品隧道式干燥器 .....	42
第二节 果蔬的厢式干燥和隧道式干燥 .....	46
一、葡萄干的厢式干燥和隧道式干燥 .....	46
二、柿饼的厢式干燥和隧道式干燥 .....	47
三、金针菜（黄花菜）的厢式干燥和隧道式干燥 .....	48
四、香菇的厢式干燥和隧道式干燥 .....	49

五、脱水蒜片的厢式干燥和隧道式干燥 .....	53
参考文献 .....	55
第三章 食品微波干燥 .....	56
第一节 微波干燥原理 .....	56
一、微波加热的基本原理 .....	56
二、影响微波加热的因素 .....	57
三、微波干燥的特性 .....	58
四、微波对食品的影响 .....	59
第二节 食品微波干燥设备 .....	60
一、微波加热设备的类型 .....	60
二、微波加热器的选择 .....	65
第三节 食品微波干燥的基本原理及应用 .....	66
一、微波干燥加工的基本原理 .....	66
二、食品微波干燥加工实例 .....	69
参考文献 .....	72
第四章 食品喷雾干燥 .....	73
第一节 食品喷雾干燥原理 .....	73
一、基本原理 .....	73
二、喷雾干燥特点 .....	73
三、食品喷雾干燥的工艺流程 .....	75
四、食品喷雾的干燥系统 .....	78
第二节 食品喷雾干燥设备 .....	81
一、食品喷雾干燥设备的基本要求 .....	81
二、食品喷雾干燥设备组成 .....	82
三、食品喷雾干燥设备实例 .....	86
第三节 喷雾干燥应用实例 .....	92
一、果汁晶 .....	92
二、奶粉 .....	93
三、葛根粉 .....	95
四、蛋白粉 .....	97
参考文献 .....	98
第五章 食品真空干燥 .....	99
第一节 食品真空干燥原理及设备 .....	99
一、食品真空干燥的基本原理和特点 .....	99
二、真空干燥设备 .....	101
第二节 果蔬的真空干燥 .....	105

一、胡萝卜真空干燥 .....	105
二、荔枝真空干燥 .....	111
三、龙眼微波真空干燥 .....	112
四、板栗真空干燥 .....	113
参考文献 .....	119
第六章 食品冷冻干燥 .....	120
第一节 食品冷冻干燥历史 .....	120
一、国外食品冷冻干燥历史 .....	120
二、国内食品冷冻干燥历史 .....	121
第二节 食品冷冻干燥理论基础 .....	122
一、水的相平衡状态图 .....	122
二、物料中水分的冻结 .....	122
三、冷冻干燥中的传热和传质 .....	123
第三节 冷冻干燥设备 .....	127
一、冷冻干燥装置系统及其分类 .....	127
二、冷冻干燥设备的主要组成部分 .....	129
三、冷冻干燥装置的类型 .....	133
第四节 冷冻干燥工艺 .....	136
一、产品的前处理 .....	136
二、共熔点及其测量方法 .....	136
三、产品的预冻 .....	137
四、产品的第一阶段干燥 .....	138
五、产品的第二阶段干燥 .....	140
六、影响干燥过程的因素 .....	140
七、冻干曲线时序的制定 .....	141
八、冻干的后处理 .....	143
九、冻干制品的质量管理 .....	144
第五节 冷冻干燥应用实例 .....	146
一、生物活性物质冷冻干燥 .....	146
二、果蔬冷冻干燥 .....	151
三、食用菌冷冻干燥 .....	153
四、动物食品冷冻干燥 .....	156
五、其他 .....	159
参考文献 .....	160
第七章 食品渗透干燥 .....	162
第一节 食品渗透干燥原理 .....	162

一、渗透脱水的定义 .....	162
二、渗透脱水的历史 .....	162
三、渗透脱水的原理 .....	163
四、渗透脱水中的物质迁移 .....	164
五、影响果蔬渗透脱水的因素 .....	165
六、渗透脱水应用中的问题和前景展望 .....	169
第二节 食品渗透干燥实例 .....	169
一、蓝莓渗透脱水 .....	169
二、苹果渗透脱水 .....	170
三、蘑菇渗透脱水 .....	170
参考文献 .....	171
第八章 干制品的包装和储运 .....	172
第一节 包装 .....	172
一、干制品包装及分类 .....	172
二、干制品包装的作用 .....	174
三、干制品包装的要求 .....	174
第二节 干制品的包装材料和容器 .....	176
一、纸类包装材料及其包装容器 .....	176
二、金属材料包装及其容器 .....	176
三、玻璃材料包装及其容器 .....	177
四、塑料材料包装及其包装容器 .....	177
第三节 包装前干制品的处理 .....	178
一、筛选分级 .....	178
二、回软 .....	178
三、防虫 .....	178
四、速化复水处理 .....	179
五、压块 .....	180
第四节 干制品的包装技术 .....	181
一、干制品的填充技术 .....	181
二、干制品的袋装技术 .....	181
三、干制品的装盒技术 .....	182
四、干制品的防潮包装技术 .....	183
五、干制品的真空和充气包装技术 .....	184
六、干制品的脱氧包装技术 .....	185
第五节 干制品的储运 .....	186
一、干制品的储藏要求 .....	186

二、干制品的运输要求 .....	187
参考文献 .....	188
第九章 食品干燥加工过程的 HACCP .....	189
第一节 食品企业 HACCP 体系 .....	189
一、食品企业安全管理体系 .....	189
二、食品企业 HACCP 体系应用准则 .....	190
第二节 食品干燥过程的 HACCP 分析 .....	199
一、食品干燥的 HACCP 分析的过程 .....	199
二、干燥过程的 HACCP 分析 .....	200
三、蔬菜干燥过程的 HACCP 管理与分析 .....	204
参考文献 .....	209
第十章 干制品质量标准与质量检验 .....	210
第一节 干制品质量标准 .....	210
一、国内标准 .....	210
二、国际标准 .....	219
第二节 干制食品质量检验内容与方法 .....	222
一、干制食品检验 .....	222
二、干制品质量检验的规则 .....	224
三、干制品质量检验具体内容与方法 .....	224
参考文献 .....	238

# 绪 论

## 一、食品的干燥加工

干燥 (drying) 指在自然条件下或人工控制条件下促使产品中水分蒸发的工艺过程。脱水 (dehydration) 指为了保证产品品质变化最小, 在人工控制条件下促使产品水分蒸发的工艺过程。但是在现代食品加工工业中, 脱水这一术语并不是泛指所有从食物中除去水分的操作过程。例如炸马铃薯、烘烤饼干、烤面包或是烤牛排时, 这些食物都会失去水分, 但是这些操作并不仅仅是为了移走体系中的水分, 还存在着其他实质性的变化, 如煮熟、增香、褐变和软化等。这些实质性变化的重要性远胜于对干制的要求, 这些加工过程完全是以它的实质性变化为特征的, 因而人们并不认为这些操作是食品脱水的一种形式。同样道理, 浓缩过程只是除去了食品体系的一部分水分 (比如制备浓缩果汁、浓缩牛奶和浓缩汤汁等), 因此浓缩也不属于目前被普遍认可的食品脱水范畴。

干燥是食品保藏的重要手段, 也是一项重要的食品加工技术。食品的种类繁多, 而且绝大多数食品的加工都与干燥密切相关。随着人民生活水平的提高, 人们越来越关注食品干燥产品的品质, 对食品的品质提出了更高的要求。干燥过程对农产品和食品产品的品质具有很大的影响, 有时甚至起到决定性的作用。众所周知, 现在仍占主导地位的热风干燥对食品的色泽、维生素 C 及其他生物活性物质破坏的程度较大, 而目前要获得优质干燥产品常常需要采用昂贵的方法和设备, 如冷冻干燥。干燥的经济性和产品质量之间目前还存在着很大的矛盾, 如何以低能耗和低成本去获得优质的脱水干燥产品, 是当前农产品和食品干燥研究中亟待研究和解决的问题, 也是干燥技术研究和发展中一项最大的挑战。

我国是一个农业生产大国, 2005 年我国稻谷年产量达 1.8 亿吨, 占世界稻谷总产量的 30% 左右; 小麦年产量达 9744 万吨, 居世界首位; 玉米年产量 2 亿吨, 占世界总产量的 40% 以上。2004 年我国的水果产量达 8394 万吨, 蔬菜产量达 5.5 亿吨。但我国由于产地交通不便和加工技术落后, 产后损失超过 30%, 在经济上造成巨大的损失。发达国家非常重视产后加工技术, 产品的损耗率一般控制在 5%~20%, 因此, 在粮食、蔬菜、水果的采后进行干燥处理具有十分重要的意义。

脱水蔬菜作为一种新兴的食品种类, 越来越受到人们的青睐。在日本、美国、中国香港等国家和地区, 此类食品已成为一种适应现代人快节奏、高频率生活方式的方便食品。在我国它不仅在即食食品领域大量使用, 而且也是旅游、边

防、地质等部门解决“吃菜难”的有效途径。此外，作为蔬菜深加工产品的一种，脱水蔬菜具有新鲜蔬菜的色、香、味、质，便于储运，储藏时间长，因而近 10 多年来国内外市场上脱水蔬菜的需求量逐年增加，我国的脱水蔬菜加工业也正是在这种需求持续大幅增长的促动下得到了迅猛的发展。

近十几年来，脱水蔬菜在各国迅速崛起，并形成了三大市场：

(1) 食品工业原料或配料市场 例如食品添加剂、方便食品中的配菜等。

(2) 调味品市场 例如洋葱粉、大蒜粉、辣椒粉等。

(3) 作为新鲜蔬菜替代品的特殊市场 例如，地质勘探、部队野营训练、海岛和雪山等边防哨所、冬季旅游等特殊场所的蔬菜供应。

发达国家大品种蔬菜的脱水比例很高。在美国，洋葱占脱水比例收获量的 20%；大蒜占收获量的 80%；葡萄占收获量的 25%。而我国，除辣椒外，其他蔬菜的脱水比例都非常低。

国际市场上，冻干食品的需求量正在逐年增加。因为冻干食品质量轻，复水快，色、香、味俱佳，因此，它在登山、航海、探险、军队野战等特殊场合中具有不可替代的地位。冻干食品还是宇航员在太空中的主要食品。

冻干食品问世之初，主要产品只是冻干速溶咖啡、冻干牛肉等，现在除各种冻干果蔬外，还有冻干鸡蛋片、冻干虾、冻干汤料、冻干海鲜、冻干蛋白粉、冻干速溶茶、冻干面条、冻干什锦米饭、冻干粥、冻干豆腐等。全世界冻干食品的产量，20 世纪 70 年代仅 20 万吨，到 20 世纪 90 年代已达到上千万吨。近些年冻干食品的消耗量：美国在 500 万吨以上，日本在 160 万吨以上，法国在 150 万吨以上。这些冻干食品的消费大国，每年有相当数量的冻干食品由其他国家进口，例如日本每年花 1000 亿日元进口冻干食品。我国幅员辽阔，地处亚热带、温带，适宜多种蔬菜、水果的生长。并且我国劳动力资源丰富，价格便宜，发展脱水蔬菜和脱水水果等产品具有广阔的前景。

## 二、食品干燥加工的特点

### 1. 便携

食品经脱水加工后，重量减轻，体积缩小，可节省包装、储藏和运输费用，并且便于携带，供应方便。如甜橙汁可溶性固形物（soluble solid）为 12°Brix（白利糖度），干制后其水分又几乎全部蒸发掉，则干制品的质量只剩下了原来的 1/8。也就是说，237mL 甜橙汁可以做成 28.35g 的固体，复水饮用时可以加入 207mL 水进行调制。果汁制成粉末状后虽然其体积的降低程度与质量的降低通常不在一个水平上，但是固体体系的体积总是小于原来的液态体系。值得注意的是，并不是所有脱水干制品都是这样，采用冷冻干燥技术时，原有食品的大小和形状不受影响，依然如故。当然，有些时候运输费用的下降并不决定于货物质量，而取决于体积，因而冷冻干燥食品的包装和运输费用并不比新鲜的低一些。

表 0-1 表明了各种脱水干制品的容积都低于新鲜的、罐藏的或冷冻食品的容积。

表 0-1 各种新鲜食品和保藏食品的容积/(m<sup>3</sup>/t 新鲜食品)

食品种类	新鲜食品	脱水干制食品	罐藏或冷冻食品
水果	1.42~1.56	0.085~0.200	1.416~1.699
蔬菜	1.42~2.41	0.142~0.708	1.416~1.699
肉类	1.42~2.41	0.425~0.566	1.416~1.699
蛋类	2.41~2.55	0.283~0.425	0.991~1.133
鱼类	1.42~2.12	0.566~1.133	0.850~2.124

## 2. 干燥食品可延长保藏期

脱水干制技术的不断发展,提高了干制品的品质,还改善了它的耐藏性和复水性。因此,现在脱水干制技术不仅用于食品保藏,而且已发展成为生产方便食品的重要方法。常见的方便食品如速溶咖啡和速煮面条实际上也是干制品,它们是浸泡或蒸煮后脱水干制的成品,食用时只需加水复原后即可食用。

### 三、食品干燥加工的方法

食品干燥加工的方法可以区分为自然干燥和人工干燥两大类。自然干燥就是在自然环境下干制食品的方法,属于这类干制方法的有晒干、风干和阴干等。目前,世界上有许多地区仍在使用日晒的方法处理食品。虽然这种方法对某些地区和某些食物来说确实是一种十分经济的干燥方法,但是它仍然有着许多明显的不足之处。日晒强烈地依赖于天气,干燥过程较慢,对许多高品质的食物不适用,而且水分含量通常难以降低到 15% 以下。从储藏稳定性的角度来说,对于大多数食品,这一水分含量显然太高。此外,日晒法需要大面积空地,日晒过程中食品很容易被污染或被灰尘、昆虫和鼠类侵染,有时甚至会沾上鸟类的粪便。

人工干燥就是指在人工控制的条件下使食品水分蒸发的工艺过程。食品的人工干燥方法较多,一般按加热方式可分为四大类:

#### 1. 对流干燥

热量以对流的方式传递给湿物料,使食品原料中的水分气化,而达到干燥的目的。一般传热介质为湿空气。湿空气的作用是将加热器的热量传递给湿物料,同时将湿物料气化出来的水分带走。根据空气的流动状态,湿空气有时也起流化物料、输送物料的作用。对流干燥成本低,是食品工业中应用最普遍的干燥技术,如固定床干燥、流化床干燥、喷雾干燥等。

#### 2. 导热干燥

热量通过与食品原料接触的加热面直接导入,使物料中的水分气化排除,达到干燥的目的。这种干燥方法要求食品原料与加热面之间应该有良好的接触表面,同时,食品原料的导热性能也要好,否则,将造成接触表面处过热、焦化等不良现象。导热干燥一般用于液体食品物料较多,有时为了加快干燥过程,降低

水分气化温度，往往在真空下进行。

### 3. 辐射干燥

热量通过电磁波的形式由辐射加热器传递给食品原料表面，再通过材料自身的热量传递，使内部的水分气化，达到干燥的目的。这种干燥方法常用于较大面积的原料。有时为了加快干燥过程，降低水分气化温度，往往配合真空技术进行。辐射干燥在食品工业上应用较多，它除了具有脱水作用外，同时还有杀菌作用。如果再配备真空环境，干燥过程中还有降低氧化速率的作用，是干燥热敏性食品、易氧化食品的有效方法。

### 4. 介电加热干燥

在高频电场中，食品原料中的水分子处于高速旋转与振动，由此产生的热量使水分气化，达到干燥的目的。

微波或无线电波频率干燥时，湿物料在高频电场中很快被均匀加热，由于水分的介电常数比固体物料的介电常数高，当干燥到一定程度时，物料内部的水分比表面水分多，物料内部所吸收的电能比表面多，致使物料内部的温度高于表面温度，温度梯度与水分扩散的浓度梯度方向一致，即传热和传质的方向一致，使干燥时间大大缩短。这一特点是对流干燥、导热干燥和辐射干燥无法比拟的。

## 四、食品干燥的历史

食品干制是一种具有悠久历史的加工方法。1000多年前出版的北魏贾思勰的《齐民要术》中就有关于干制方法的记载。如“种椒”篇中记有：“天晴时摘下，薄布，曝之令一日即干，色赤椒好。若阴时收看，色黑失味”；又“种柿”篇中记有：“柿有树干者，也有火焙令干者”。在明代李时珍的《本草纲目》中则提到了采用晒干制桃干的方法。在《群芳谱》一书中记有先烘枣而后密封储藏的方法。

干制保藏食品的知识显然是从自然界各种现象中得到的。生长在田野中的谷类、豆类和坚果成熟时在太阳下曝晒下就自然地会脱水干燥。以谷物为例，它在太阳下曝晒其水分含量可以降至14%左右，即使不采用进一步的干燥措施，这一干燥程度也足以实现谷粒的有效保藏。许多植物种子和香辛料也是如此。对于某些水果，如无花果和枣子。采用日晒等方法让成熟的果实在采摘前自然干燥，糖分含量会大大增加。因此，在日常生活中人们可以用晒干或风干方法干制鱼、肉。食品干制科学正是起源于这些自然干燥现象。然而由于自然干制需时较长，动物性食品常会在未完全干燥之前就已腐败变质，所以逐渐地人们开始使用烟熏和盐渍配合自然风干的方法来处理需要储藏的食物。

自然干制为我国长期广泛采用的干制法。我国著名土特产如葡萄干、红枣、柿饼、干辣椒、金针菜、玉兰片、萝卜干、梅干菜、香蕈等都是晒干或阴干制成；肉制品中的风肉、火腿和广东香肠经风干或阴干后再行保存。自然干制的特

点是方法和设备简单，管理粗放，生产费用低，能在产地就地进行，还能促使尚未完全成熟的原料进一步成熟。但是，自然干制干燥缓慢，难以制成品质优良的产品。并且会受到气候条件的限制，食品常会因阴雨季节无法晒干而腐败变质。同时还需要大面积晒场和大量劳动力，劳动生产率极低。此外，还容易遭受灰尘、杂质、昆虫等污染和鸟类、啮齿类动物等的侵染，既不卫生，又有损耗。

为了在异常的气候条件下仍能及时干制，以免食品腐败变质，在不断实践中终于摸索出使用人工加热的干制方法。我国民间长期以来采用的烘、炒、焙等干制方法正是这样逐渐形成的。不过由于每批处理量并不大，不利于大规模生产。适宜大批量生产的干制方法于 1875 年才出现。最初是将片状蔬菜堆放在室内，通入 40℃ 热空气进行干燥，这就是早期的热空气干燥方法。其后，随着科学和生产技术的不断发展，逐渐发展为工业化生产的规模。

人工干制在室内进行，不再受气候条件的限制，操作容易控制，干制时间大大缩短，产品质量显著提高，产品得率也有所提高，这是由于干制能及时阻止生化变化，以致如糖分等一类物质损耗量得以减少。正由于此，人工干制方法才得到了迅速发展。

## 五、食品干燥加工技术的进展

食品的干燥从简单使用太阳能发展到目前各种各样的干燥方法及设备（如窑炉干燥、盘式干燥、隧道干燥、带式干燥、喷雾干燥、滚筒干燥、冷冻干燥、渗透压脱水、流化床干燥），使用微波或无线电波频率干燥、组合干燥等。脱水技术的发展大致经历了四代，或者可把所有的干燥设备按其发展先后分为四组。

### （一）第一代干燥技术及设备

箱式、床式干燥器（包括窑炉干燥、盘式干燥、隧道干燥、带式干燥等）属于第一代干燥设备。这类干燥设备主要利用流动的热风对产品进行加热和干燥，适合于固体物料的干燥，如谷物、切片的果蔬、块状食品等。这类干燥器现在仍然得到广泛的应用，其技术进步主要围绕着提高传热和传质系数。流化床干燥等就是通过物料的流化来提高传热和传质效果，可视为这类干燥器的发展。

### （二）第二代干燥技术及设备

喷雾干燥、滚筒干燥属于第二代干燥设备，主要解决了液态、泥状物料的干燥问题。喷雾干燥的主要优点为：能得到颗粒大小均匀的粉末状产品；能连续操作，自动化程度高；物料在干燥器内的停留时间短，热敏性物质的损失少。缺点是干燥的物料不能太稠，固形物含量一般不超过 30%，物料太黏，干燥困难。滚筒干燥弥补了喷雾干燥的缺陷，一般用于干燥固形物含量较高的黏稠物料，有单滚筒和双滚筒式，布料方式也有多种多样，尤其在淀粉工业得到广泛应用。

### （三）第三代干燥技术及设备

冷冻干燥和渗透压脱水属于第三代干燥技术，冷冻干燥能保留干燥产品原有

的形态，最大限度减少色、香、味和生物活性物质的损失；渗透压脱水是将物料浸渍于高渗透压的溶液，如糖溶液、盐溶液等，主要用于水果和蔬菜的脱水。冷冻干燥过程分为两步：产品的冻结和升华干燥。冻结在 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下，升华阶段压力必须在三相点的压力（627Pa）以下进行。微波冷冻干燥就是对升华阶段的加热使用微波代替传统的辐射加热，加快升华速度，节省能耗。这是近年来冷冻干燥技术的发展，其主要问题是控制微波能的大小较困难，目前该项技术还未得到全面推广应用。

#### （四）第四代干燥技术及设备

微波或无线电波射频（RF）干燥、组合干燥代表了干燥技术的最新发展。微波和无线电波频率是物料内部和外部同时加热，改变了传统的由表及里的加热方式，极大地提高了干燥速度。工业微波使用的频率为 $(2450 \pm 50)\text{MHz}$ 和 $(915 \pm 50)\text{MHz}$ 两个频率。RF的加热原理与微波加热类似，频率小于微波频率，穿透深度大。RF与微波的主要区别在于产生高频电场的方式不同，RF主要由高频振荡器、传输线和应用器（相当于电容器）组成，而微波主要由磁控管、波导和谐振腔组成。国际标准的RF频率为： $(13.56 \pm 0.05)\text{MHz}$ ； $(27.12 \pm 0.6)\text{MHz}$ ； $(40.68 \pm 0.05)\text{MHz}$ 。单独使用常压微波干燥，往往会导致食品内部局部过热而严重影响产品品质，特别是在干燥后期。将微波和热风干燥组合，既提高了干燥速度，又可提高干燥产品质量。微波与其他干燥方法相组合，即微波辅助干燥，是当前干燥技术研究和发展的方向。微波真空干燥实质是微波系统与真空系统的结合，由于降低了干燥系统的压力，创造了常温快速的干燥条件（干燥温度可控制在 $25 \sim 45^{\circ}\text{C}$ 范围内），使得干燥食品的色香味和生物活性成分的保留率得到很大程度的提高，几乎接近于冷冻干燥，而干燥和设备成本要比冷冻干燥低得多。微波真空干燥代表了食品干燥的最新方向。表0-2总结了各种食品干燥方法的应用范围及其优缺点。

表 0-2 各种食品干燥方法的特点

干燥方法	应用范围	优点	缺点
太阳能干燥	水果、肉、鱼、植物	简单，成本低	占地大，劳动强度大，难控制，干燥速度慢
对流干燥	低附加值产品	连续操作	难以控制
滚筒干燥	黏稠液体	连续操作	液体可能需要调理，不能太稀和太黏
喷雾干燥	稀溶液，牛奶、咖啡	球形颗粒	有一定香味损失
流化床干燥	均匀小颗粒	间歇操作，干燥均匀	对颗粒大小有要求
冷冻干燥	高附加值产品，果蔬	低温、无氧化、质量好	慢，成本高
渗透压脱水	糖溶液浸渍水果	质量好	过程要分两步
微波及无线电波频率	高附加值产品	间歇操作，速度快，质量好	成本比热风高
微波冷冻干燥	高附加值产品	低温、速度较快、质量好	成本高

在众多的干燥技术中，热风干燥虽然简单、成本低，但对产品的品质有严重影响，特别是干燥食品及生物制品；冷冻干燥产品品质好，但设备投资大和生产成本高。干燥的经济性和产品质量之间存在着巨大的矛盾，如何以低能耗和低成本获得优质的脱水干燥产品，是干燥技术研究中亟待研究解决的问题，也是干燥技术研究和发展中的一项最大的挑战。在脱水方式上，将热风干燥和真空干燥、冷冻干燥、微波干燥、远红外技术结合起来发挥各自的优势，是今后食品干燥加工的发展方向。

### 参 考 文 献

- 1 天津轻工业学院，无锡轻工业学院. 食品工艺学（上册）. 北京：轻工业出版社，1997
- 2 [美] Norman N Potter, Joseph H Hotchkiss 著. 食品科学. 第5版. 万璋，钟芳，徐良增等译. 北京：中国轻工业出版社，2001. 181~182
- 3 李云飞，葛克山主编. 食品工程原理. 北京：中国农业大学出版社，2002. 783
- 4 曾凡坤主编. 果蔬加工工艺学. 成都：成都科技大学出版社，1996. 111
- 5 徐小东，崔政伟. 农产品和食品干燥技术及设备的现状和发展. 农业机械学报，2005，36（12）：171~173

# 第一章 食品干燥加工原理

## 第一节 食品干燥储藏原理

食品干藏是指利用自然条件或人工控制的方法除去食品中一定数量的水分，以抑制食品中微生物的生长繁殖、酶的活性和食品理化成分的变化，增长食品储藏性能的保藏方法。干藏主要包括自然干藏（如晒干、风干等）和人工干藏（如热风、真空、渗透、冷冻干燥等）。干藏食品具有水分活度低，保质期较长，食品质量减轻，体积缩小，节省包装和运输费用，便于携带，有利于商品流通等特点。

食品干燥储藏具有悠久的历史，人类很早就利用自然阳光来风干谷类、果蔬及肉制品，以延长其储藏期，如水稻、玉米、葡萄干、风干肉等。自然干燥耗费能源低、所需设备少、加工成本较低，但缺点是生产效率低，需要大面积的晒场，且容易受灰尘、昆虫、鼠类的危害，产品质量、卫生安全较难保证。

欧洲工业革命以来，随着机械工业的发展，人工干藏技术很快发展起来，最早采用的人工控制加热干燥方法是烘、焙、炒，以后发展了热风隧道式干燥器以及气流式、流化床式和喷雾式干燥。人工控制干燥具有快速、卫生、质量好、工业化生产等优点，但是其能耗大、成本较高。

### 一、食品水分与食品储藏性能

#### （一）食品水分的存在形式

食品中水分的存在形式主要包括自由（游离）水分和结合水分。

##### 1. 结合水分

食品中亲水基团、带电离子与水分子发生水合作用，使水分子受到一定的束缚，这部分被束缚的水分称为结合水。水分子是极性分子，其中的氢原子带有正电荷，如果遇到电负性大的、带有孤对电子的原子，氢就会被该原子的电子云所吸引，使水分子与该原子形成氢键。如食品中的糖类、蛋白质和氨基酸等成分，含有大量的亲水性官能团，如—OH、—NH<sub>2</sub>、—CONH<sub>2</sub>、—COOH等。这些基团的氧原子和氮原子的电负性很大，并带有孤对电子，与水分子形成氢键，发生水合作用。结合水具有不能作为溶剂，难以通过干燥排除，无法被微生物、酶和化学反应所利用等特点。

##### 2. 自由水分

食品中的水分，除了结合水外，统称为自由水。自由水主要包括细胞内可自由流动的水分，细胞阻止结构中的毛细管水分，生物细胞器、膜所阻留的滞化水。自由水的特点是可作为溶剂，易蒸发排除，能被微生物、酶和化学反应所利用。

## (二) 食品水分的表示方法

根据水分在食品中的结构、性质和对食品储藏性能的影响，一般分为水分含量和水分活度两种表示方法。

### 1. 食品的水分含量（平衡水分）

根据热力学原理，食品内部的水蒸气压总是要与外界空气中的水蒸气压保持平衡状态，如果不平衡，食品就会通过水分子的蒸发或吸收达到平衡状态。当食品内部的水蒸气压与外界空气的水蒸气压在一定温、湿条件下达成平衡时，食品的含水量保持一定的数值，这一数值即为食品的含水量或食品的平衡水分，一般用百分数来表示。食品的含水量通常用干基和湿基两种方法表示：干基是指水分占食品干物质质量的百分比；湿基是指水分占含水食品质量的百分比。

### 2. 水分活度

食品所含的水分有结合水分和游离（自由）水分，但只有游离水分才能被微生物、酶和化学反应所利用，可称之为有效水分。食品中的水分，无论是结合水还是自由水，都受到不同程度的束缚，被束缚的程度越大，则水从溶液中逃逸出来形成水蒸气的趋势就越小。为了定量说明水分子在食品中被束缚的程度，通常用水分活度（ $A_w$ ）表示。

食品中水的逸度和纯水的逸度之比称为水分活度，它反应了食品中的水分被束缚的程度。

$$A_w = \frac{f}{f_0} \quad (1-1)$$

式中  $f$ ——食品中水的逸度；

$f_0$ ——纯水的逸度。

水分逃逸的趋势通常可以近似地用水的蒸气压来表示，水分活度也可定义为食品中水蒸气的压力与同温度条件下纯水的蒸气压的比值。在低压或室温时， $f/f_0$  和  $p/p_0$  之差非常小（ $<1\%$ ），可用  $p/p_0$  来定义  $A_w$  值。

$$A_w = \frac{p}{p_0} \quad (1-2)$$

式中  $p$ ——食品中的水蒸气分压；

$p_0$ ——纯水的蒸气压（相同温度下纯水的饱和蒸气压）。

水分活度大小取决于：水存在的量，温度，水中溶质的浓度，食品成分、水