

# 红枣

HONGZAO REFENG GANZAO TEXING  
JI PINZHI SHIYAN YANJIU

## 热风干燥特性 及品质试验研究

本研究通过热风干燥技术与工业PLC自动化技术相结合，设计了一种调质红枣干燥机，该干燥机具有传热系数高、物料受热均匀、节能环保、单位体积装载量高等特点

弋晓康 著

张外信

# 红枣热风干燥特性 及品质试验研究

HONGZAO REFENG GANZAO TEXING  
JI PINZHI SHIYAN YANJIU

弋晓康 著



中国农业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

红枣热风干燥特性及品质试验研究/弋晓康著. —  
北京: 中国农业出版社, 2016. 11  
ISBN 978-7-109-22222-9

I. ①红… II. ①弋… III. ①枣—食品加工 IV.  
①TS255.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 241435 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 刘明昌

北京中兴印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所发行

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月北京第 1 次印刷

开本: 720mm×960mm 1/16 印张: 10.75

字数: 170 千字

定价: 32.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

感谢国家自然科学基金项目“基于水势的南疆红枣干燥过程水分迁移机理及控制策略研究”(31260288)、新疆生产建设兵团工业科技攻关计划“大漠枣业制干生产工艺优化与示范”(2010GG61)对本书相关研究和试验提供的资助。

# 前言

## FOREWORD

红枣在我国种植历史悠久，具有极高的营养价值和药用价值。红枣作为新疆南疆红色产业的新军，已成为自治区和兵团的支柱产业之一。干燥是红枣加工过程中最关键的环节。本研究将热风干燥技术应用于红枣的干燥，研究了红枣在不同温度和风速下的干燥特性和干燥模型；结合工业 PLC 自动化技术设计研制了调质红枣干燥机；利用调质干燥机进行红枣深层干燥试验，研究了不同干燥温度、风速和相对湿度条件下红枣干燥后的总糖含量、维生素 C 保存率、红枣色泽以及体积收缩率、复水率和干燥时间的变化规律，并对干燥后红枣的色泽进行了检测和分析。

红枣热风干燥特性研究表明：干燥温度和风速均对红枣的干燥时间有显著影响；红枣的干燥时间随着干燥温度和风速的提高而减少；红枣的热风干燥分为加速干燥和降速干燥两个阶段；通过费克第二定律求出了热风干燥过程中红枣的水分有效扩散系数，其随着干燥温度和风速的升高而增大；根据阿伦尼乌斯公式计算求得红枣的干燥活化能  $E_a$  为 40.14kJ/mol。

对红枣热风干燥数学模型进行研究，通过平方确定系数、卡方检验值和均方根误差评价与分析了常用的十种描述农产品薄层干燥的模型与试验数据拟合的情况，发现 Weibull distribution 模型与试验数据拟合程度最好，能很好地描述和表达热风干燥过程的含水率

比的变化规律。

本研究通过热风干燥技术与工业 PLC 自动化技术相结合,设计了一种调质红枣干燥机,该干燥机具有传热系数高、物料受热均匀、节能环保、单位体积装载量高等特点。干燥机采用保温隔热、热空气循环利用以及物料间歇循环等设计思路,干燥机控制系统能够实现对干燥温度、风速、相对湿度和循环转速等干燥工艺参数的监测与控制。

基于调质干燥机研究了干燥温度、风速和相对湿度对红枣干燥后的内在品质指标总糖含量、维生素 C 保存率的影响。通过二次正交旋转组合设计试验,获得了干燥温度、风速和相对湿度主要参数对总糖含量、维生素 C 保存率的数学模型,并结合数学模型进行了响应曲面分析。试验结果表明:红枣干燥品质指标最优工艺参数组合为干燥温度为  $57.99^{\circ}\text{C}$ ,风速为  $1.54\text{m/s}$ ,相对湿度为  $39.14\%$ ,红枣达到安全含水率时,性能指标中总糖的最大值为  $70.73\%$ ,维生素 C 保存率的最大值为  $7.49\%$ 。

对红枣热风干燥收缩特性进行研究,通过二次回归中心组合设计试验,获得了干燥温度、风速和相对湿度主要参数对体积收缩率、复水率和干燥时间影响的数学模型,并结合数学模型进行了响应曲面分析。试验结果表明:红枣干燥最优组合为干燥温度为  $60.04^{\circ}\text{C}$ ,风速为  $1.42\text{m/s}$ ,相对湿度为  $39.89\%$ ,红枣达到安全含水率时,性能指标中体积收缩率最优值为  $80.27\%$ ,复水率的最优值为  $1.45$ ,干燥时间的最优值为  $24.33\text{h}$ 。

利用色差仪检测了红枣的色泽变化。研究表明:随着干燥温度的升高,干燥后红枣的明亮度  $L^*$  不断下降,而且随干燥温度的增大,温度对明亮度  $L^*$  值的影响越来越显著,说明较低的干燥温度有利于获得较大的明亮度值  $L^*$ ;干燥后红枣的绿红值  $a^*$  逐渐下降;而且随干燥温度的增大,温度对绿红值  $a^*$  的影响越来越显著,说明

较低的干燥温度有利于获得较大的绿红值  $a^*$ ；干燥后红枣的蓝黄值  $b^*$  逐渐下降；而且随干燥温度的增大，温度对蓝黄值  $b^*$  的影响越来越显著，说明较低的干燥温度有利于获得较大的蓝黄值  $b^*$ ；干燥后红枣的饱和度值  $C^*$  不断减小；干燥后红枣的色泽角值  $H$  不断减小，红枣的色泽比值  $h$  不断增大；干燥后红枣的色差值  $\Delta E^*$  不断上升，表明较低的干燥温度有利于降低红枣色差值  $\Delta E^*$ 。

弋晓康

2016 年 8 月

# 目 录

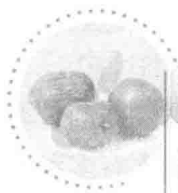
## CONTENTS

### 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....           | 1  |
| 1.1 研究的意义 .....          | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....        | 12 |
| 1.3 研究方案 .....           | 19 |
| 第 2 章 红枣热风干燥动力学研究 .....  | 23 |
| 2.1 材料与方法 .....          | 24 |
| 2.2 干燥动力学的数学计算 .....     | 27 |
| 2.3 结果与分析 .....          | 30 |
| 2.4 小结 .....             | 50 |
| 第 3 章 红枣热风干燥模型的研究 .....  | 52 |
| 3.1 材料与方法 .....          | 54 |
| 3.2 结果与分析 .....          | 56 |
| 3.3 小结 .....             | 72 |
| 第 4 章 调质红枣干燥机的设计 .....   | 74 |
| 4.1 调质红枣干燥机的总体设计思路 ..... | 74 |
| 4.2 调质红枣干燥机的总体结构设计 ..... | 76 |



|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 4.3        | 调质红枣干燥机主要工作部件设计 .....        | 79         |
| 4.4        | 调质红枣干燥机智能测控系统的研究 .....       | 88         |
| 4.5        | 调质红枣干燥机的人机工作界面 .....         | 95         |
| 4.6        | 调质红枣干燥机的测试试验 .....           | 97         |
| 4.7        | 小结 .....                     | 101        |
| <b>第5章</b> | <b>红枣热风干燥品质及工艺优化研究 .....</b> | <b>103</b> |
| 5.1        | 材料与方法 .....                  | 105        |
| 5.2        | 试验结果与分析 .....                | 110        |
| 5.3        | 小结 .....                     | 124        |
| <b>第6章</b> | <b>红枣热风干燥收缩的研究 .....</b>     | <b>126</b> |
| 6.1        | 材料与方法 .....                  | 129        |
| 6.2        | 试验结果与分析 .....                | 132        |
| 6.3        | 小结 .....                     | 145        |
| <b>第7章</b> | <b>结论和展望 .....</b>           | <b>147</b> |
| 7.1        | 结论 .....                     | 147        |
| 7.2        | 创新点 .....                    | 150        |
| 7.3        | 展望 .....                     | 150        |
|            | 参考文献 .....                   | 151        |



## 第 1 章

# 绪 论

## 1.1 研究的意义

### 1.1.1 红枣及其营养价值

枣 (*Chinese jujube*), 又称红枣、大枣、华枣、干枣等, 是鼠李科枣属植物的果实。枣树作为我国特有的果树, 栽培历史悠久, 据考证, 最早记载枣树栽培的史书是《诗经》, 并认为最早栽培的地区是黄河中下游一带。此外, 《尔雅》《夏小正》, 汉代的《西京杂记》, 北魏的《齐民要术》, 元代的《打枣谱》, 明代的《本草纲目》《便民图纂》, 清代的《授时通考》《植物名实图考·长编》等都对枣有记载, 说明我国枣树栽培历史悠久, 历代都受到重视。20 世纪 70 年代在河南新郑裴李岗、密县新石器时代和陕西西安半坡遗址发掘出碳化枣核和干枣, C14 测定结果表明, 距今已有  $7240 \pm 80$  年历史, 标志着农耕文明尚未兴起之前红枣已被广泛利用, 这就为枣原产我国及黄河中下游最早栽培提供了有力证据。

根据出土文物证实, 20 世纪 60 年代以来, 先后在我国南部的湖北随州、江陵、云梦, 湖南长沙, 广东广州, 江苏连云港, 四川昭化, 北部的甘肃武威, 西部的新疆吐鲁番古高昌国等地古墓中均发掘出枣核和干枣遗迹。这些古墓均已有 2000 年以上的历史, 说明早在 2000 年前枣树在中国广大地域已广泛栽培。现在世界上其他国家和地区的枣树, 均是直接或间接引自中国, 红枣的历史就是从中国传播到世界各地的历史。曲泽洲等

(1987)、任继海(1998)和梁鸿(2006)研究发现大约在2000年前,枣树自我国传至邻国朝鲜、缅甸、印度、泰国等国家,后经“丝绸之路”传入波斯及地中海沿岸的希腊、罗马、叙利亚直至欧洲。公元9世纪红枣从我国唐代传入日本,19世纪红枣由欧洲传入美国。

红枣被列为“五果”(桃、李、梅、杏、枣)之一,具有极高的营养价值和药用价值,被誉为“木本粮食”。红枣的化学成分主要含有多种氨基酸、糖类、有机酸、胡萝卜素、各种维生素和钙、磷、铁等。经中科院分析中心测定,干枣中的含水量为25%~30%,糖为50.3%~86.9%(还原糖为主)、蛋白质2.92%~4.0%、脂肪0.2%~0.96%、粗纤维1.6%~3.1%、磷0.09%~1.27%、钾0.61%~1.05%、钙0.03%~0.06%、胡萝卜素0.4mg/100g、核黄素0.15mg/100g、尼克酸1.2mg/100g、无机酸1.4mg/100g、硫胺素0.6mg/100g、维生素B<sub>2</sub>20.05mg/100g、维生素B<sub>1</sub>20.15mg/100g。鲜果中维生素C的含量高,在果品中素有“百果之冠”的美誉,100g鲜枣中维生素C高达500~800mg,是苹果的70~80倍,比柑橘高7~10倍,维生素P也高达330mg/100g以上。此外,枣果中还含有人体必需的18种氨基酸,其中有8种人体不能合成的必需氨基酸,以及幼儿体内不能合成的组氨酸和精氨酸。

红枣作为药用,早在汉代《本经》论枣:“主心腹邪气,安中养脾,助十二经。平胃气,通九窍,补少气,少津液,身中不足,大惊,四肢重,和百药。”李时珍在《本草纲目》中写道:“枣味甘、性温,能补中益气、养血生津。”《名医别录》中记载:“补中益气,强力,除烦闷,疗心下悬,肠僻癖。”《日华子本草》中记载:“润心肺,止嗽,补五脏,治虚劳损,除肠胃癖气。”《黄帝内经》中记载:“肝色青,宜食甘,粳米牛肉枣葵皆甘。”现代医学研究证实,红枣含有丰富的三萜类化合物和环磷酸腺苷(CAMP),具有抑制癌细胞生长和繁殖的功能,对皮肤红疹、荨麻疹、湿疹、支气管哮喘等,有明显的抗过敏作用。现代药理学研究证明,红枣具有降低血清中的胆固醇、养肝护脾、养血补气、康复和抗疲劳、安神益气和养颜、防治心血管疾病、提高机体免疫力等作用。红枣作为我国的特色果品之一,是集药、食、补三大功能为一体的果品资源。

### 1.1.2 红枣产业发展状况及干燥必要性

中国拥有着世界上红枣品种的95%以上,世界范围内如韩国、朝鲜、日本等国均种植红枣,但这些国家的花枣栽培面积和产量都不大,韩国是除了我国之外的一个在种植红枣方面规模化的国家。我国枣资源十分丰富,品种有736个,其中干燥或鲜食干燥品种224个,占30.4%。我国著名的优良红枣品种众多,主要有金丝小枣、骏枣、灰枣、鸡心枣、壶瓶枣、黄河滩枣、新郑大枣、阜平大枣、冬枣、赞皇大枣等。其中最为著名的有北京的郎家园枣、山西的板枣、山东与河北的金丝小枣、河南的灵宝枣、陕西的大荔枣、新疆若羌的有机红枣等,都被誉为“枣中之王”。这些红枣皮薄肉美,味馨极甜,曾在巴黎博览会上受到国际友人的好评。北京的“老虎眼”圆枣、陕西的大荔圆枣、甘肃的敦煌圆枣和山西太谷的壶瓶枣等都是大枣中的上品。还有新疆楼兰地区的若羌红枣,作为获得国家地理标志产品保护的品种,在若羌地区特殊的生长环境,使若羌红枣具有极佳的口感,是枣中的滋补佳品。

我国的花枣分为南枣和北枣两大类。南枣主要在长江流域的丘陵地区零星栽培;北枣主要分布在黄河中、下游地区,栽培面积大、产量高、品种多、质量好。全国枣树栽培面积100多万 $\text{hm}^2$ ,主要分布在黄河中下游的山西、陕西、河南、河北、山东以及新疆,其中山西红枣的种植主要分布在临县、稷山、太谷、石楼、保德、柳林等县市区,陕西红枣的种植主要分布在佳县、清涧、延川、大荔、泾阳、阎良等县区,河南红枣的种植主要集中在内黄、新郑、西华、灵宝、濮阳、桐柏等县市,河北红枣的种植主要分布在行唐、赞皇、阜平、曲阳、唐县等市区,山东红枣的种植主要分布在乐陵、庆云、无棣、沾化、河口、宁阳等市县,新疆红枣的种植主要分布在天山以南的巴州、阿克苏、和田、喀什及兵团第一师、第二师、第三师、第十四师。

目前我国红枣年产量达400多万t,占世界总产量的99%,在红枣产业的生产和贸易方面,中国的花枣占有近100%的国际贸易市场,产销占据绝对主导地位。据《中国林业统计年鉴》显示,2014年全国红枣(干

重)的总产量为 4 175 519t。其中新疆为 1 993 329t (其中新疆兵团为 727 509t), 占 47.74%; 河北为 525 095t, 占 12.58%; 陕西为 421 297t, 占 10.23%; 山东为 282 903t, 占 6.78%; 山西为 269 568t, 占 6.46%; 辽宁为 226 233t, 占 5.42%; 河南为 125 513t, 占 3.01%。可以看出, 新疆已成为我国红枣的主要生产基地。新疆自 2002 年以来, 全面实施了退耕还林工程, 把发展红枣产业列为扶贫项目, 发挥当地独特的气候特征和丰富的土地资源, 采取培育区域龙头企业、开发潜在市场、加快品牌建设、完善农业社会化服务体系、培育农业合作组织等一系列措施, 目标是建设成中国最大的“绿色红枣生产基地”。新疆红枣与内地红枣相比具有果形饱满、色泽鲜亮、皮薄肉厚、口感甘甜醇厚的特点。据 2012 年在新疆哈密举办的“中国新疆红枣产业发展高峰论坛”官方统计, 全区红枣种植面积达 45 万  $\text{hm}^2$  (其中地方 35 万  $\text{hm}^2$ 、兵团 10 万  $\text{hm}^2$ ), 位居全国第 2 位, 占全国红枣总面积的 1/4, 主要品种 14 个, 产量 62 万 t, 产值 74 亿元。红枣作为新疆红色产业的新军, 正日渐成为自治区和兵团的支柱产业之一。

### 1.1.3 红枣干燥的理论发展现状

随着新疆红枣产业的不断发展, 产业链中局部技术已获突破, 但是红枣产业链上规模化生产缺乏系统性。尤其是红枣生产加工技术与产业发展速度的不匹配, 使红枣的附加值没有得到充分发挥。由于鲜枣中含有约 80% 的水分, 生理代谢旺盛, 采后易腐烂变质, 每年损失严重。红枣干燥新技术与装备的开发已成为农业产后加工技术发展的重点, 以安全储藏水分为目标的干燥过程控制技术取得了一定进展, 但能够保证干燥品质, 具有稳定性、抗干扰性、鲁棒性的精确控制系统仍有待于进一步研究和开发, 干燥品质的进一步提升需要红枣干燥理论的不断进步与发展。

#### (1) 干燥模型的发展

为解决红枣干燥环节中存在的问题, 国内学者对红枣的干燥理论和技术进行了研究, 期望其研究结果能够揭示红枣的干燥特性及干燥工艺。杨

林青(1993年)应用静态法测定了红枣在 $10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 和全相对湿度范围内的吸湿、解吸平衡含水率,分析了相对湿度、温度对平衡含水率的影响,得到了描述红枣吸湿、解吸平衡含水率曲线模型。淮秀兰(1998)建立粒状物料干燥过程中传热传质数学模型,预测了干燥过程中物料的含湿量及温度等的变化。崔明辉(1999)分析了影响蜜枣太阳能对流干燥特性的因素,探讨了难干物料蜜枣在间歇干燥时传热传质特性的规律,并建立了相应的干燥数学模型。崔明辉(2006)分析了影响蜜枣传质特性的因素,对蜜枣在间歇干燥过程中间歇前后的干燥速率进行了对比,得出了蜜枣对流干燥的最佳工况,建立了蜜枣干燥的数学模型。1996年,郑尧研究干燥过程数学模型,列出了气流干燥过程六变量常微分方程。2002年,赵平针对空气为干燥介质、湿分为水分的对流干燥过程,从能量衡算出发,对节能措施进行理论分析,建立连续对流能量方程。2011年,刘坤等运用鼓风恒温干燥箱研究了红枣的干燥特性,以温度为影响因素,确立了Page方程为红枣干燥数学模型。尽管以上研究在红枣干燥领域取得了一定的成果,但很少采用水势理论分析红枣内部水分迁移规律及品质变化;没有从根本上分析干燥参数与水势之间的关系,水势与干燥速率和干燥品质之间的关系;缺乏对红枣干燥过程控制技术及模拟等系统性研究工作。因此,以品质控制为核心的红枣干燥机理与技术还有待进一步完善。

## (2) 传热传质问题的提出与发展

多孔介质中的热质迁移是一个非常复杂的过程,受各种内在与外在因素影响。到目前为止,国内外学术界对此过程的各种影响因素还未能有公认的统一描述。从工程传热学的发展来看,从1822年热传导的傅里叶定律问世,到Lewis、Sherwood将传热学扩展成传热传质学经历了一个世纪。Lewis率先提出了固体材料干燥的理论,之后,干燥技术与理论在不断加深与应用。含湿多孔介质材料的干燥过程是干燥物内部向外部热传递与水分迁移的过程。经过多年来众多学者的研究,依据水分在物料内部迁移过程的相态、运动形式、驱动力等因素,相继提出了液态扩散理论、毛细理论、蒸发理论等一系列方法来描述干燥过程中质量迁移的过程。在此基础上,Nowicki等率先提出了多孔介质干燥过程中

的孔道网络研究理论, 在多孔介质干燥过程中孔道空间中流体及气相的流动可以用规则的孔道网络来描述。但孔道网络理论在多孔介质干燥过程中的研究目前仍停留在理论分析阶段, 缺少对实际物料的研究验证。在实际干燥过程, 不同物料的内部结构并不是与理论研究中假设的一致性相关, 理论的描述方法有一定的局限性, 并不能直接应用于实际物料干燥生产工艺。

我国的传热传质科学试验研究始于 20 世纪 50 年代, 得益于各种热机与热力设备的广泛使用, 传热传质的研究开始向农业学、生物学、气象学、海洋学等领域发展。胡松涛 (2001) 基于雷柯夫原理的传热与传质方程组, 着重研究了等速干燥条件下, 多孔介质内部毛细传热与传质过程中的交叉相互效应, 建立了等速干燥条件下的多孔介质传热传质模型, 并利用该模型分析了干燥过程中各因素对内部温度场和湿度场的影响以及交叉效应在干燥过程中的作用。卢涛 (2003) 基于体积平均理论, 把含湿多孔介质的毛细微观变化过程视为宏观上的虚拟连续型介质, 分析了含湿多孔介质干燥过程中湿度迁移流体扩散变化形式, 基于多孔介质干燥过程中的固相、液相、气相在质量平衡、能量守恒规律中的关系, 建立多孔介质湿度流体形式的传热传质数学模型, 并利用预测了纸张干燥的干燥状态参数的变化规律, 优化提高了纸张干燥机的干燥工艺参数。丁小明 (2004) 利用多孔介质孔道的网络模型进行了干燥过程的模拟试验, 从微观角度分析了介质干燥过程中的内部湿度迁移规律, 但在实际干燥过程中, 多孔介质内部的孔道网络并不是均匀一致的, 导致了模拟试验并不与实际干燥过程相同。中国农业大学的袁越锦 (2007) 研究了一种二维分孔道的数学模型, 并利用试验方法, 揭示了自然对流多孔介质的热风干燥特性。刘彬 (2011) 为了研究大型流化干燥机的成套设备, 采用小型流化干燥试验台对发酵柑橘皮渣进行了干燥过程的传热与传质研究, 结果表明发酵柑橘皮渣的传热传质性能与流体的物理特性、干燥机的工艺参数、介质本身的内部特性紧密相关。结合试验数据, 建立了传热传质数学模型的平衡方程式, 为强化干燥设备, 提高干燥效果提供了理论依据。

基于干燥方法与传热传质理论的发展, 进入 21 世纪以来, 随着红枣干果的需求量急剧增加, 对红枣干燥特性的研究、红枣干燥设备的研究有

了快速的发展。陈建东(2010)进行了新疆哈密枣在不同处理情况下的微波干燥实验,结果表明,在红枣去处理后,红枣表面微波温度为 $70^{\circ}\text{C}$ 时红枣的复水效果与干燥效果最佳。但实验仅考虑了微波温度对红枣干燥特性的影响,忽略对红枣干果品质的干燥效果。微波干燥利用分子间的摩擦作用,干燥效率较高,但微波干燥存在局部的高温与高热现象,造成干果表面皱褶,影响红枣观感品质。同时,目前对微波干燥特性处于研究阶段,开发应用技术不成熟,投资也过大,不利于实际应用。李万里(2011)基于多孔介质非平衡不可逆热力学理论,对红枣干燥的传热传质过程进行了仿真分析,并建立了红枣干燥过程中的传热传质数学模型。但受条件限制,没有进行实验验证,可应用性不强。吉林大学的吴文福(2012)等研究了红枣在不同风速与不同风温条件下的干燥速率变化情况,并对试验数据进行了参数拟合,得出了红枣在风速与风温条件影响下的干燥数学模型。鲁洁(2013)研究了阜平红枣热风干燥特性,对试验数据进行了模型的拟合,得出了最优拟合效果的 page 模型。在红枣干燥的基础上,刘小丹(2012)对陕西木枣进行了微波—热风联合干燥特性的实验研究,结果表明木枣在干基含水率为 $66\%$ 时转为热风温度为 $55^{\circ}\text{C}$ 干燥控制方式下获得最优的干果品质。

吴文福、尹丽妍等(2006)通过基于水势分析,建立了谷物低温真空干燥的数学模型。该模型能够同时反映粮食初始水分、平衡水分、干燥温度、介质压力、介质湿度等对干燥过程的影响规律。吴文福、徐泽敏等(2007)通过基于水势的分析,建立了稻谷真空干燥过程中水分迁移的速率模型,该模型反映了干燥速率与干燥温度、环境的相对湿度及真空度的关系。

### (3) 干燥过程控制的发展

从20世纪60年代起,国外学者就开始研究干燥过程自动控制问题,一些发达国家,如美国、日本产的粮食干燥机已经实现了干燥作业半自动化和干燥介质温度控制的自动化。到了20世纪70年代,随着电子技术的飞速发展,应用传统控制理论实现了粮食干燥过程的自动化。至今由于微型计算机的迅速普及,智能控制系统,如专家系统、模糊逻辑控制等已经开始应用于粮食干燥过程控制。1989年,Zhang等研究了连续横流式粮



食干燥机的模糊控制方法,实现了出口粮食水分的安全控制。1994年,Zhang等开发了横流式粮食干燥机模糊控制器,通过调整加热器功率和排粮电机转速来控制干燥机出口水分。密歇根州立大学的F. W. Bakker和刘强出席1999年IFT年会提交的论文提出了一种新的干燥机含水率控制策略,它由模型预测控制算法和近年来迅速发展的分布参数过程模型组成,对于控制非线性和静态时域过程非常有效。

我国干燥过程智能控制的研究出现在20世纪90年代初期,中国农业大学曹崇文教授进行了研究。1993—1997年,曹崇文教授先后发表数篇论文,详细介绍了其关于粮食干燥过程模糊数学方法和模糊神经网络控制方法的研究成果,包括干燥机的模糊控制和模糊优化、干燥品质的模糊预测等问题。2003年,张吉礼等在分析了粮食干燥过程热工特性及影响干燥机出口粮食含水量的关键因素基础上,提出了粮食水分在线检测和模糊神经网络预测控制方法,开发了粮食参数在线检测与智能预测控制软件。2003年,吉林大学吴文福等在研究玉米变温干燥工艺对玉米水分下降和粮食品质的影响规律的同时,利用虚拟仪器、现场总线、人工神经网络等开发了玉米干燥智能测控系统,该系统在东北地区进行了大面积应用。2005年吴文福、刘雪强等研究了基于多元统计、主元分析和神经网络等方法的干燥过程控制算法,在模拟实验系统上进行了验证,可以对粮食的水分进行有效控制。

早在1940年以前就出现了预测干燥机内粮食和热空气间的热质传递模型。其中比较著名的是美国W. V. Hukill教授的粮食深层干燥模型,利用一个干燥方程和一系列的无因次曲线计算干燥过程中在一定的干燥时间后,谷床内任意深度处的粮食水分。1965年英国D. S. Boyce建立了一个深层干燥模型,并首次对粮食干燥过程进行了计算机模拟,他所用的模型是半经验型的,计算结果与试验数据不完全符合。1967年以来,美国T. L. Thompson教授对各种类型的粮食干燥机进行了大量的研究,提出了模拟干燥过程的平衡模型。他的理论依据是假设在一定的时间段内,粮食水分与一定温度和一定湿度的热空气处于平衡状态。他还假设粮食温度与热空气的温度相等,因而计算比较简单。这是一个经验模型,可用于模拟低温干燥过程,经改进后也可用于模拟高温干燥过程。1970年以来,