**标题：**

预熟化芸豆热风微波联合干燥特性及数学模型研究

**摘要：**

为了提高芸豆的干燥品质和效率，研究了应用热风和微波联合干燥芸豆的最优工艺，采用不同干燥方式下芸豆的干燥特性和品质，并建立数学模型对芸豆水分和破损率进行预测和模拟。结果表明：[结果待测定及整理]。热风-微波联合干燥是适合芸豆干燥较好的技术方法。

**关键词：**

芸豆，干燥工艺，干燥特性，热风-微波联合干燥，数学模型

**前言：**

芸豆学名菜豆，是普通菜豆和多花菜豆的总称，属豆科菜豆属的小宗杂粮作物，具有很高的营养价值以及药用价值[1]。经常使用有健脾壮肾的作用，是脾弱肾虚者的一级补品[2]。目前市场上芸豆相关产品主要有芸豆馅、芸豆营养粉丝以及其在雪糕、饼干、面包、八宝粥食品中作为主要食材等。

为实现将芸豆作为一种与大米共煮的粗粮的商业化，需要将预熟化的芸豆进行干燥处理，达到与大米煮制时共熟的效果。热风干燥法是常规的干燥方法，具有设备简单易于操作成本低廉的优点。但由于热风干燥后期芸豆水分去除的困难，导致长时间热风干燥后的芸豆产品品质下降，表皮破损或者爆裂。故后期的干燥使用微波进行，微波干燥的优点是速率快，用以保障芸豆的感官。以预熟化过的芸豆为原料，对其热风-微波联合干燥特性进行研究，探讨热风干燥温度、时间对预熟化过的芸豆水分以及品质的影响。同时以近现代农产品干燥数学模型为基础，对实验所得的数据进行拟合，得到预熟化过后的芸豆的热风-微波联合干燥的数学模型。为预熟化芸豆粗粮工业化生产提供理论依据。

**试验材料、仪器设备和方法**

试验材料：

紫花芸豆：松原三井子商贸有限公司，其含水率为12.00%，大小均匀，无霉变病虫粒。

仪器设备：

压力锅：MY-13SS506A型，美的公司

数显恒温水浴锅：HH-2型，常州澳华仪器有限公司

电子天平：ES-200HA型，长沙湘平科技发展有限公司

电热恒温鼓风干燥箱：DHG-9240A型，上海精宏实验设备有限公司

微波炉：EM-L530TB型，合肥荣事达三洋电器股份有限公司

方法：

工艺流程：

芸豆->筛选->清洗->恒温浸泡->低压蒸煮->热风干燥->冷却->微波干燥->冷却->成品

芸豆预熟化：

称取300.00g芸豆，浸泡（？30）分钟，放入低压蒸煮锅中将压力调至（5kPa）进行低压蒸煮5分钟，将蒸煮过后的芸豆捞出沥干。

单独热风干燥：

每次称取120.00g经过预熟化过的芸豆3份，铺成薄层，分别放入电热恒温鼓风干燥箱中进行70、80、90℃的热风干燥。每隔5分钟对芸豆进行称重，同时测量芸豆的破损率，记录数据，直至含水率达到（？20%~30%）时停止干燥。

单独微波干燥：

每次称取120.00g经过预熟化过的芸豆（？3）份，铺成薄层，分别放入微波炉中进行（？400W、600W、800W）功率下的干燥，每隔（？1）分钟对芸豆进行称重，同时测量芸豆的破损率，记录数据，直至含水率达到（？20%~30%）时停止干燥。

热风和微波联合干燥：

前期使用热风进行干燥，取（？100g）预熟化过的芸豆，平铺成薄层，芸豆不可以堆叠，放入电热恒温鼓风干燥箱中进行80℃的热风干燥，直至达到转换点水分（？20%）时停止，冷却，进入后期微波干燥。即将热风干燥后的芸豆放入微波炉中进行（？700W）的微波干燥，每隔30秒称芸豆质量以及表皮的破损率，直至含水率达到（？20%~30%）时停止干燥。

试验指标及方法：

干基含水率测定：



在本式中：为芸豆在t时刻的含水率（%），为芸豆的初始含水率（%），为t时刻芸豆的质量（g），为芸豆初始质量（g），为芸豆的干重。

干燥速率测定：



在本式中：DR为干燥速率（%/min），为t时刻的干基含水率（%），

失去水分所需要的时间（min）。

水分比计算：



在本式中：为水分比，为t时刻物料干基含水率（%），为初始时刻物料干基含水率（%），为无聊干燥平衡时的含水率（%）。由于芸豆的平衡含水率很小，在这里水分比采用了简化过的水分比，即 

破损率计算：



在本式中：Br为破损率，bt为t时刻破损的芸豆质量，mt为t时刻芸豆的质量。

常用的描述农产品物料薄层干燥的四种模型[3]：

指数模型：

单项扩散模型：

Page方程模型：

经验模型： 

在式中：MR为水分比，exp为指数函数，t为干燥持续时间（min），K为干燥速度常数，A为待定干燥速度系数，n为幂指数，均是与干燥条件有关的常数。

数据分析：

采用Spss19.0软件进行数据分析

**结果与分析：**

芸豆的预熟化：

预熟化的三组芸豆的质量分别为（？502g、515g、508g）。可计算出其干基含水率分别为（？89.39%，97.73%，74.62）。

预熟化后的芸豆单独热风干燥：

预熟化后的芸豆经过单独热风干燥度结果见图1和图2。由图1可知，在单独热风干燥中，水分比随着干燥的时间呈指数型的下降。由图2可知，干燥初期（？0~20）分钟是芸豆样品的预热阶段，干燥速率从0升至最高值（？70%/h），即调整阶段。当干燥时间为（？20~240）分钟时干燥速率随干燥时间下降至（？20%/h）。

热风干燥后的爆破率结果见（？图3），由（？图3）可知，在90℃的热风干燥中，后期爆破率急剧上升；而80℃和70℃下的爆破率较为平稳。

预熟化后的芸豆单独微波干燥：

预熟化后的芸豆由于含水率较高，经微波干燥后发生显著的爆裂，破损率相当之高，故不适于微波干燥。

预熟化后的芸豆热风与微波联合干燥：

预熟化后的芸豆经过前期（？70℃）热风、后期500W、700W、900W的微波干燥结果见（？图6、图7、图8）。由（？图6）可知，（？0~100min）为前期热风干燥，水分比随干燥时间的延长从100%下降至（？53.04），原基含水率从（？%）下降到（？%）；（？106~200min）为后期微波干燥，水分比随时间的延长迅速下降至（？%），原基含水率从（？%）下降到（？%），达到了所要求的干燥标准。

预熟化后的芸豆的干燥模型的建立：

根据预熟化后的芸豆的干燥曲线（？图123），采用SPSS19.0软件进行分析，结果见（？表1）。

由表可知，对于单独热风干燥，（？ln(-lnMR)）与（？lnt）的平均（？R2）值最大，拟合程度很好。在关系式（？ln(-lnMR)=lnk+nlnt）中，（？k）与干燥参数的关系式为

（？k=ae）

n与干燥参数的关系式为

（？n=c+dT+eT）

在本式中：（？abcde）为常数，T为干燥介质绝对温度。由此得到：

（？Ln(-lnMR)=lna-b/T+clnt+dTlnt+eTlnt）

对其进行多元线性回归分析，确定其系数分别为：（？Lna=17321，a=~，b=~，c=~，d=~，e=~），该方程的（？R2=0.9496）。

故单独热风干燥模型为：

（？将多元线性回归分析得到的参数带入Page方程中）

对于微波热风联合干燥，前期热风干燥模型与单独热风干燥模型相同。后期微波干燥中，lnMR与t的（？R2）值最大，拟合较好。在关系式（？lnMR=lna-kt）中，k与干燥参数的关系式为：（？k=b+cT+dT），其中（？b、c）为常数，T为干燥介质绝对温度。由此得到：

（？lnMR=lna-bt-ctT-dtT）

对其进行多元线性回归分析，得到联合干燥后期的干燥模型中的系数分别为（？lna=~，b=~，d=~）该方程的（？R2=0.999）。因此，微波热风联合干燥的干燥模型为

（？MR=~~~）

预熟化芸豆热风干燥破损率：

记录预熟化芸豆经过70℃、80℃、90℃三种不同温度下的热风干燥的破损率，对每种温度下的三组样品的破损质量取平均值，计算出三种温度下的破损率，其结果折线图见（？图5）

由（？图5）可知，破损率随着热风干燥时间的延长而增加，而且破损率的上升速率也在增加。考虑到热风干燥的时间与破损率，找到了在（？80℃）下所能容忍的最长热风干燥时间，该时间为（？分钟）。

预熟化芸豆热风微波联合干燥破损率：

芸豆经过（？80℃）下的热风干燥（？分钟）后达到了要求的含水率，再使用微波干燥进行后续的热风微波联合干燥。经过热风干燥后的芸豆分别在500W、700W、900W的功率下干燥，对每种功率下的三组样品的破损质量取平均值，计算出三种功率下的破损率，其结果折线图见（？图6）。

由（？图6）可知，经过热风干燥后的芸豆达到了所要求的含水率，以该含水率为干燥起点，进行的微波干燥的破损率依然随着微波干燥的时间的延长而上升，且功率越大破损率上升就越快，在900W下的微波干燥的破损率已经超出了所能容忍的范围，高功率下的高破损率导致生产成本的上升是不值得的。结合（？图3），当干燥时间达到（？分钟）时，原基含水率达到了（？33%），达到了最终的要求，此时的破损率为（？10%）。

**结论：**

1. 对芸豆进行热风与微波联合干燥实验，由其干燥速率曲线克制，联合干燥过程分为调整、降速、调整、恒速、降速5个阶段，后期采用微波热风干燥的效率较高，显著提升了芸豆的脱水效率。
2. 在干燥前期采用热风干燥去除预熟化过的芸豆的水分，避免使用微波干燥方式导致的芸豆爆裂情况发生。后期采用微波干燥去除剩余的水分，提升干燥的速率，避免长时间的持续热风对芸豆表皮品质的损害。
3. 通过建立芸豆的热风-微波联合干燥模型，并给出了具体参数，可以对经过预熟化后的芸豆干燥过程进行预测，从而对后续的生产研究提供理论依据和准确数据支持。模型中，Page模型（？MR=exp(-kt)）适合用来描述预熟化后的芸豆热风微波联合干燥的前期阶段，相关系数（？R2）的平均值为0.9941；单项扩散模型（？MR=ae）适合用来描述联合干燥的后期阶段，其相关系数（？R2）的平均值为0.9987。
4. 预熟化后的芸豆适合于热风-微波联合干燥，通过本文的模型以及数据可使芸豆干燥效果达到速度与品质的最优解决方案。

参考文献：

1. 张丙云, 袁亚兰, 高瑜璟,等. 芸豆蛋白的营养价值和功能特性研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(11):347-350.
2. 李清泉. 芸豆的应用价值及高产栽培技术[J]. 内蒙古农业科技, 2007(4).
3. 袁月明, 陈丽梅, 王鸿斌,等. 玉米丸粒化种子的薄层干燥试验及其干燥模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3):169-173.

表1 芸豆的三种薄层干燥模型比较

Table 1 Comparison of drying models for beans

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 模型名称 | 方程 | 线性形式 | 相关系数 | |
| 单独热风 | 后期联合干燥 |
| 单项扩散模型 |  |  |  |  |
| Page模型 |  |  |  |  |
| 经验模型 |  |  |  |  |

致 谢

完成了毕业论文，大学四年的生活已经接近尾声。当年怀着要在食品行业里干出一番成就志向的我，如今也转行当了程序员。食品给了我很多的希望和失望，虽然近期可能不会从事食品行业，但我从食品专业的同学以及老师那里学到很多比专业知识更加珍贵的东西。

非常感谢于雷老师在我大学的最后学习阶段——毕业设计阶段给予我的指导，从最初的开题，一直到资料的收集，以及论文的写作、修改直到定稿，他给了我耐心的指导和无私的帮助。为了直到我们的毕业论文以及试验，他放弃了自己宝贵的个人时间，他的这种无私奉献的敬业精神和对学生的负责令人深深钦佩，在此我向于雷老师以及他所指导的研究生们表示我最诚挚的谢意。

通过这一阶段的努力，我的毕业论文《预熟化芸豆热风微波联合干燥特性及数学模型研究》终于完成了，这也意味着我的大学生活即将结束。在大学期间，我在学习上和思想上都受益匪浅，这除了自身的努力只为，与各位老师、同学和朋友们的关心、支持以及鼓励是分不开的。

写作毕业论文是一次再系统学习的过程，毕业论文的完成，同样也意味着新的学习生活的开始。我将铭记我曾是一名农大学子，在今后的科研和工作中把农大的优良传统发扬光大。