

谷物干燥

副清嵐译

DRYING
CEREAL
GRAINS

中国农业机械出版社

谷 物 干 燥

[美]D. B. 布鲁克
F. W. 阿克马 著
C. W. 霍 尔

周清澈 译
解承基 校
丁霄霖

中国农业机械出版社

《谷物干燥》一书共分九章，主要介绍了谷物贮藏的特性、空气与谷物水分的平衡、干燥气流的湿度计算、空气运动原理、以及其它基础工程数据，并对农作物的干燥方法与设备作了分析，重点论述了减少霉菌和昆虫生长的一种手段的干燥问题。可供有关技术人员参考，也可供高等院校有关专业参考。

DRYING CEREAL GRAINS

DONALD B. BROOKER

FRED W. BAKKER-ARKEMA

CARL W. HALL

WESTPORT, CONNECTICUT

THE AVI PUBLISHING COMPANY, INC.

1 9 7 4

* * *

谷 物 干 燥

[美]D. B. 布鲁克

F. W. 阿克马 著

C. W. 霍尔

周清澈 译

解承基 丁霄霖 校

*

中国农业机械出版社出版

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

*

850×1168 32开 8¹⁰/₁₆印张 225 千字 插页1

1981年3月 北京第一版 1981年3月 北京第一次印刷

印数 0,001—3,200 定价: 0.95元

统一书号: 15216·035

出版说明

西欧、北美及日本等国，在发展农业机械化过程中，很注意干燥机械，使之与收获机械相适应。目前，干燥机械已经成为机械化农业生产单位必不可少的重要设备，而且在整个农业机械中占有重要地位。

我国干燥机械及有关基础理论还处于开始研究及发展阶段，遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们将《谷物干燥》一书翻译出版。该书介绍了谷物贮藏的特性、空气与谷物水分的平衡、干燥气流的湿度计算、空气运动原理，以及其它基础工程数据，并对农作物的干燥方法与设备作了分析，重点论述了减少霉菌和昆虫生长的一种手段的干燥问题。可供有关技术人员参考，也可供高等院校有关专业参考。

由于我们的水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，希望广大读者批评指正。

1980年2月

序

一九五七年霍尔所著《农作物干燥》一书乃应时之作。当时，美国玉米地带的农场主正采用玉米联合收获机，通过联合收获从田间运回的高水分玉米必须经过贮藏前处理。对玉米进行干燥的兴趣迅速扩大到别的作物。霍尔的著作提供了当时的基础知识与理论。

十五年来的研究与进展已给干燥设备与方法带来了显著的变化。计算机的采用与模拟技术的进展促进了生物产品干燥理论的研究。本书力图对有关谷物干燥与处理理论和方法的最新基础知识加以论述。谷物贮藏特性、空气与谷物水分的平衡、干燥气流的湿度计算、空气运动原理，以及其它基础工程数据等均加以论述。并对农作物的干燥方法与设备作了详尽的分析。

本书试图对各种不同水平的读者提供资料。工程师们将对所有章节都感兴趣。农大学生可能希望删去有关干燥模拟一章以及有关气流运动一章的部分内容。大量技术性不多的东西安排在单独的章节论述。有关谷物的变质与干燥系统两章对谷物生产者与加工者可能都有用。

本书系有关谷物的研究，重点是玉米。只有少量内容涉及到稻谷的干燥。然而，所论述的原理可用于分析许多农产品的干燥过程。

本书的打字稿承南希·布鲁克校阅，谨致谢意。

密苏里大学农业工程教授 D·B·布鲁克

密执安大学农业工程教授 F·W·阿克马

华盛顿大学工程学院院长 C·W·霍尔

目 录

第一章	谷物干燥原理	1
第一节	谷粒的生理学	1
第二节	谷物的贮存	3
第三节	谷物的损失	4
第四节	谷物分级要求	6
第五节	水分含量的测定	7
第六节	谷物的发芽率	9
第七节	谷物的清选	10
第八节	受污染的谷物	11
第九节	谷物的贮藏	11
第十节	干燥的重要性	16
第十一节	干燥的参数	17
第十二节	干燥气流温度的影响	19
第十三节	干燥系统的选择	20
第二章	湿空气的特性	23
第一节	几个湿度计算名词的含义	23
第二节	湿空气特性的热力学关系	25
第三节	湿空气非理想气体定律的特性	35
第四节	湿度计算图	35
第三章	谷物的变质	49
第一节	谷物质量	49
第二节	收获	50
第三节	干燥	51
第四节	贮藏	53
第四章	谷物的平衡水分	68
第一节	平衡水分值	68
第二节	平衡水分的测定	76
第三节	平衡水分的数学模型	77
第四节	解吸与吸湿	82

第五节	汽化热	83
第五章	气流运动	88
第一节	气流阻力	88
第二节	系统曲线	98
第三节	多仓时的系统曲线	100
第四节	风机	103
第五节	地板上的通风管道	114
第六节	风量	117
第七节	非线性系统的分析	119
第八节	线性与非线性气流系统的比较	122
第九节	非线性气流数值计算方法的分析	123
第六章	固定床干燥系统的初步分析	131
第一节	干燥过程	131
第二节	干燥的热平衡	132
第三节	气流流量	132
第四节	天气的分析	132
第五节	湿度计算图	133
第六节	汽化热	134
第七节	一普式尔的含义	135
第八节	谷物水分	136
第九节	深床层干燥系统的分析	139
第七章	谷物干燥系统	147
第一节	分批干燥系统	148
第二节	连续流动式干燥系统	170
第三节	干燥通风作业	180
第四节	通风作业	183
第八章	谷物干燥理论与模拟	190
第一节	单粒干燥	190
第二节	深床干燥	199
第三节	谷物干燥模拟的应用	208
第九章	干燥机操作与安全控制	228
第一节	电路与燃气管路	228

第二节	气态引出的一些考虑	230
第三节	液化石油气从贮罐到干燥机的流动	232
第四节	燃气在干燥机内的流通	234
第五节	温度的传感	236
第六节	湿度的传感	237
第七节	气流的传感	238
第八节	分批式自动干燥的控制	238
附录 A	各种数据表	241
附录 B	现场干燥装置的风量测定方法	253
附录 C	数据换算	255
附录 D	湿度计算与玉米干燥的数学模型	259
附录 E	湿球温度与干湿球温度差	265

第一章 谷物干燥原理

谷物是人类粮食及牲畜饲料的主要来源。就总产量而言，小麦在世界谷物中占首位。稻米作为人类食物来源，在谷物中是无可比的，特别是在东方，是世界稻米供应的主要产区。在美国，玉米种植面积的扩大与产量的增加都超过了其它谷物。其它一些重要谷物就是大麦、燕麦、黑麦和高粱（见表1-1）。

谷物单位面积产量正在迅速提高，近二十年来至少增加了一倍，这是由于采用了新品种、肥料，以及防治杂草、虫害等措施的结果。由于产量的提高，为了经济地保管所生产的粮食，则有必要继续强调收获、处理与干燥。

第一节 谷粒的生理学

有关水分进入谷物籽粒的运动，特别是在籽实的发育阶段，以及因大气条件的回潮等，都已经进行过大量的研究。对潮湿籽粒在处理或干燥过程中水分流动的研究，为发展切实可行的干燥方法提供了许多有用的知识。

一个单独籽粒，外面裹有一薄层果皮，果皮下面是种皮。在种皮下面为糊粉层，这是水分从籽粒内部向外流出的通道（图1-1，1-2，1-3）。糊粉层为胚乳的一部分。水分从谷粒各个部分的流动取决于籽粒内部的特性、糊粉层及外果皮的可渗透性，

表1-1 世界主要谷物年产量估计数（吨），（六十年代末）

大	麦	112×10^6
玉	米	238×10^6
燕	麦	64×10^6
稻	谷	188×10^6
黑	麦	42×10^6
高	粱	24×10^6
小	麦	300×10^6

资料来源：克里斯坦森和考夫曼(1969)；肯特-琼斯(1967)；马茨(1969)。

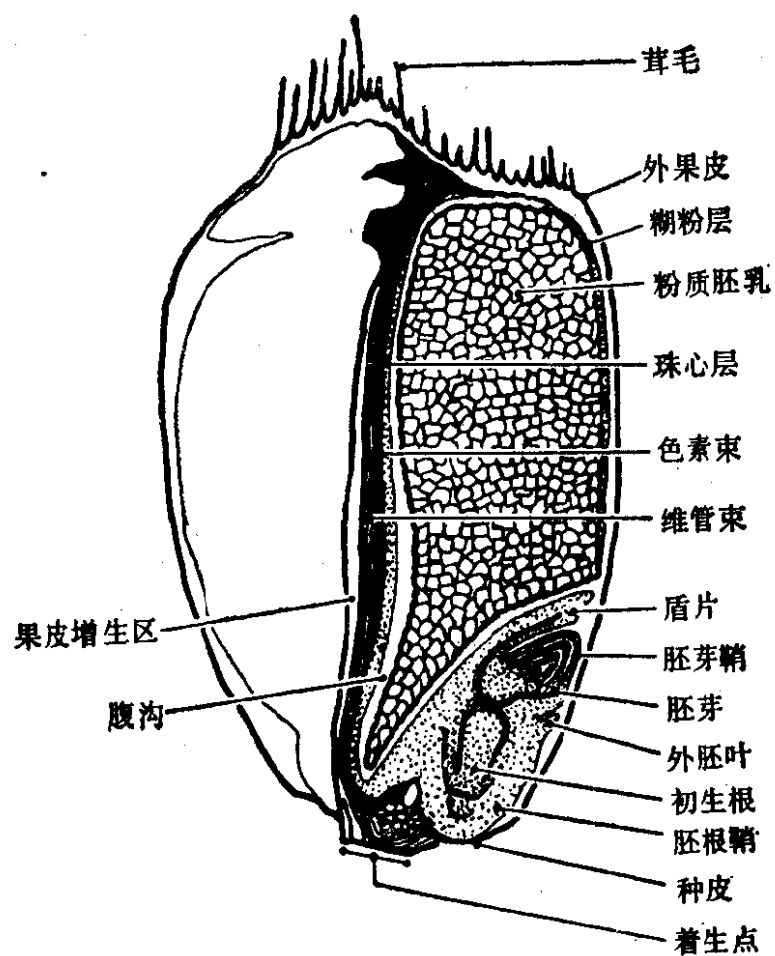


图1-1 小麦籽粒剖面图

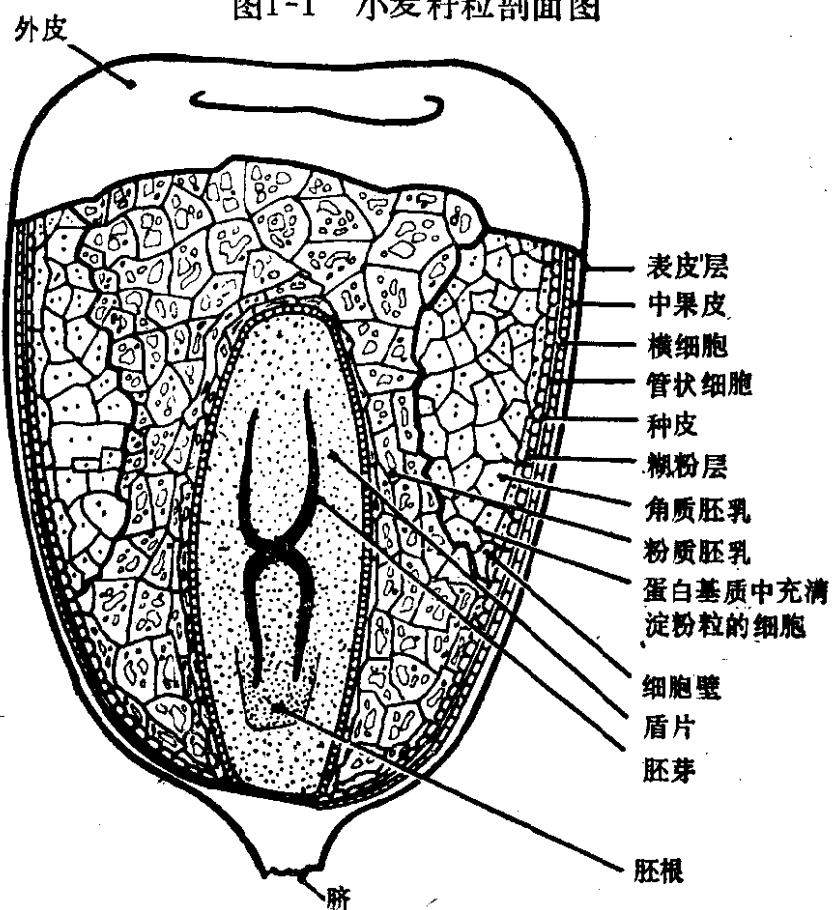


图1-2 玉米籽粒剖面图

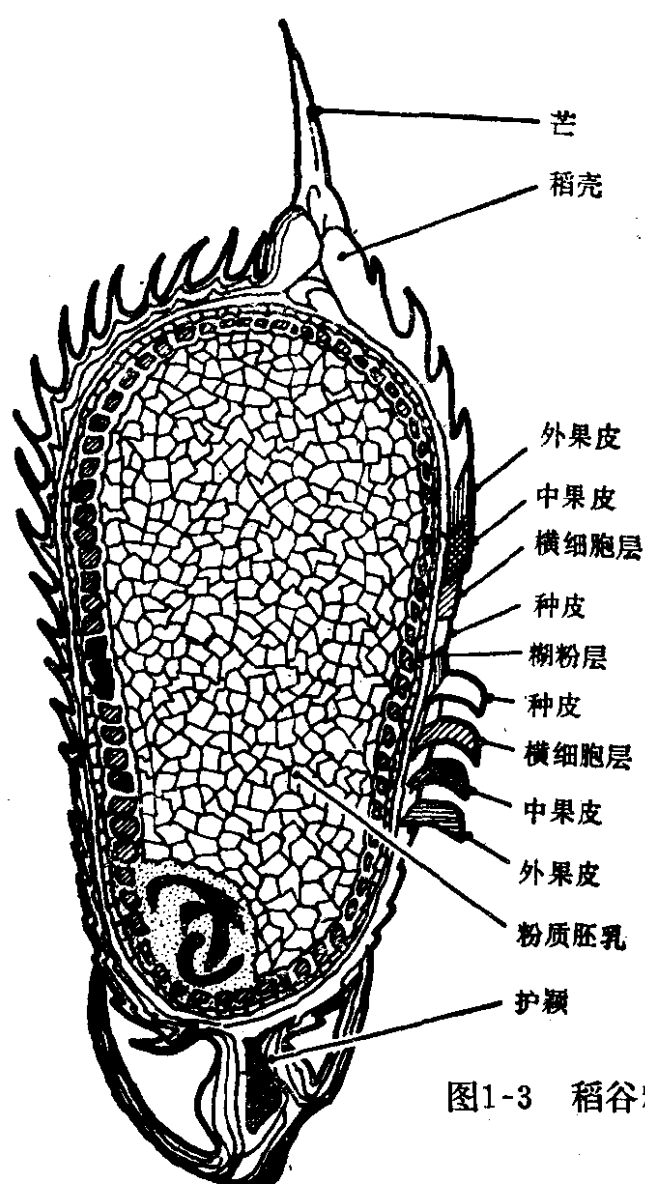


图1-3 稻谷籽粒剖面图

以及这些层次破裂的程度。

第二节 谷物的贮存

当前已有各种不同保存农产品的方法。这些方法的一种或几种相结合可以看做处理或保存谷物的一种手段。

一、干燥或脱水

去除水分是防止霉菌和昆虫生长发育的有利环境。本书重点是论述减少霉菌和昆虫生长的一种手段的干燥问题。

二、密闭贮藏

脱粒的湿玉米可以安全地贮存在密闭的贮藏设备里。谷物的

水分含量必须满足有关微生物能够进行适当的呼吸，以便消耗掉密闭结构内已有的氧气，并产生二氧化碳防止谷物籽粒的变质。玉米湿贮藏要求的水分含量为25%、小麦18%、稻谷20%、大麦和燕麦20%。若出现某些发酵现象，则可采用辅助的保护措施，防止贮藏损失。密闭贮藏的结果减少或制止了谷物的发芽。从密闭贮藏中取出的谷物必须在24~48小时内喂饲掉或加以利用，以避免谷物表面微生物过度生长的可能性。微生物的生长多半是依环境的温度和湿度而定。密闭贮藏的谷物系用作牲畜饲料，通常是在生产与消费相结合的同一个地区内贮存。

三、冷藏

大气温度下降到40°F以下时，生物产品与微生物的呼吸率则大大下降。因此，通过降低潮湿产品的温度，可以增加贮藏的期限。谷物冷藏，在西欧已经在相当大的范围内应用了，特别是用于大麦的低温贮藏。

四、化学处理

微生物周围的环境可以通过施加某些化学品使之不利生长。潮湿谷物采用丙酸和乙酸可限制微生物的生长。调制青贮饲料的过程即为化学处理的一种方式；在青贮过程中是靠产生的乳酸使需氧微生物失去活力。

第三节 谷物的损失

谷物的损失，从田间成熟到消费的时间内，不同的谷物、品种、地区与气候而有所不同，占产量的5~50%。从收获到贮藏各个阶段与水分有关的损失趋势如图1-4；在脱粒、干燥和贮存过程中，谷物损失一般随着水分含量的增加而增加。

一、田间损失

当谷物在田间茎秆上正在成熟时就蕴藏着一定的危险，如昆虫、风、雨、阳光等都会造成田间的很大损失。蕴藏的危险越大，则收获越应迅速开始并迅速完成。商品粮农场的作业人员由于想尽快地收获已成熟的作物，因而转向采用大型的收获机械。

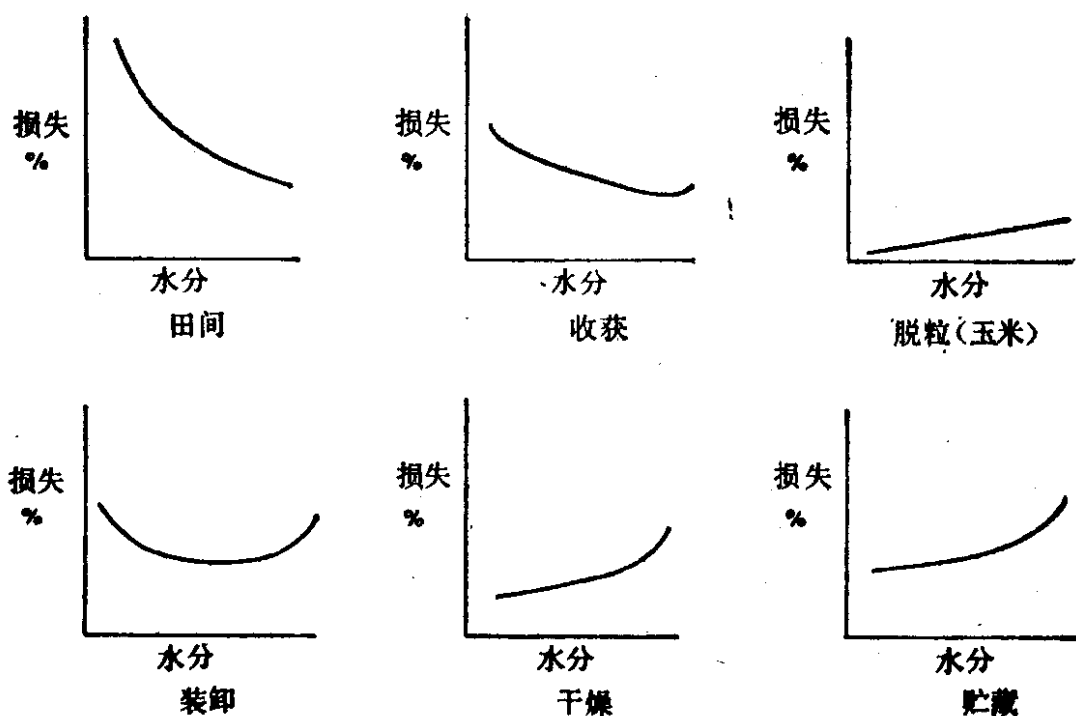


图1-4 收获与贮藏各阶段的损失

由于收获的速度很快，对适当处理收获物的要求就提高了，而这些收获物往往水分含量太高不适于常规的贮藏。

二、收获损失

美国谷物的收获损失平均为5%。损失的原因多半是由于落粒；风、虫危害植株；收获机械操作不当；生长状况不良。据报道，玉米籽粒的田间收获损失幅度为2.3~22%。非常明显，由于包含着许多可变的因素，虽然难以归纳出全世界所有谷物的损失数字，但就上述玉米的损失就足以说明损失是可观的。是否应该防止这些损失，在很大程度上要取决于防止损失所付出的代价，对所收回粮食的价值是否合算。

许多损失与产品的含水量有关，通常是根据籽粒或谷物的水分含量来说明(图1-4)。然而，要根据苞叶、茎秆水分来收获某一种谷物时，就存在着许多的困难。因为，在田间农作物的这些部分的水分变化比籽粒快的多。

谷物的收获损失，可以通过采用适当的机器在适宜的水分时进行收获而得到减少。不同的谷物有不同的适宜收获水分，其幅度水稻为22~25%；小麦为18~20%；玉米为25~32%。在此水

分含量时，农作物已经成熟，并已达到了最高的干物质的积累。如果在高于适宜含水量时收获，则会导致总产量下降，并且普通的收获机将损伤谷物籽粒；在低于适宜含水量时收获，由于曝露时间长，谷物变脆、落粒及受风雨危害，可能使收获损失更大。虽然在适宜含水量时收获，田间损失与收获损失都会减少，但在其后的装卸和贮藏过程中的损失可能要大一点。如果谷物在干物质产量最高时收获，由于产品必须干燥到安全贮藏的含水量，则需额外增加作业。

三、贮藏损失

谷物在贮藏过程中由于霉烂和呼吸作用造成的损失平均为4.5%，由虫害造成的损失要再增加1~3%。通过贮藏干燥清洁完整的谷物一般湿基含水量在13%以下。对贮藏谷物进行通风以保持所要求的含水量和温度，以及向谷物通入化学药剂等办法，则可减少贮藏的损失。

第四节 谷物分级要求

谷物的各种质量因素关系到（或者说具有重大意义）谷物的物理特性、贮藏特性、保存或加工特性、以及销售价值或价格的确定。谷物的等级就是根据这些质量因素确定的，并用做说明产品在制粉、喂饲、加工、以及化学制品等最后消费时的根据。

分级也可以说成是：按商品价值与用途的某一标准分类，将谷物划分成各种不同的质量等级。分级标准可由政府、协会、或单独生产者制定。其内容包括：水分含量、容重、破碎粒、杂质、热害粒、污染等的最大极限。

谷物的水分含量系作为衡量成熟度或质量因素的一个参数。谷物价格的确定，其水分含量是主要根据。水分含量是用湿重（湿基）或干重（干基）为基础求得水分所占的百分数来表示。市场价格通常按湿基水分计算；干基水分则在许多工程计算中使用。

$$M_w \text{ 湿基} = \frac{w - d}{w} (100\%)$$

$$M_d \text{ 干基} = \frac{w - d}{d} (100\%)$$

式中 w = 湿重, d = 干重, M = 水分%。为了求得准确的水分含量, 所采样品必须有代表性。采样与测定水分的方法往往由协会、买主、商人、以及政府代办机构规定。

在商业上采用每普式尔的容重作为重度的计量单位, 等级越高容重也越高 (一等为最高等级)。容重是通过一定容积 ($1\frac{1}{8}$ 夸特) 的样品称重来确定的, 然后将所测得的数量换算成每普式尔的磅数。

各种条件及其对等级影响的关系见附录表 A-8、A-9、A-10、A-11。凡不符合最低等级要求的谷物则按等外处理。

第五节 水分含量的测定

产品水分的测定方法可分为直接与间接测定两大类。主要问题是要保证样品能够代表整个要测的东西。从取样到测定必须保持样品的水分含量不变。按规定使用标准金属容器及薄膜样品袋保存样品。有些水分测定方法要求将样品磨碎, 样品水分含量与大气湿度接近平衡时进行。

一、直接测定法

1. 烘箱测定法——不同物料含水量的测定已有若干种方法。常用的方法是在空气-烘箱内去掉产品的水分。一般采用的方法有两种: (1) 将谷物磨碎, 而后在烘箱内以 266°F (130°C) 温度烘干1~2小时; (2) 将完整的谷粒放入烘箱, 以 212°F (100°C) 温度烘干72~96小时。水分含量的测定应按照官方农业化学家协会 (AOAC) 制定的标准和 (或) 政府的规定进行。

要去除高含水量样品的水分, 主张采用两步干燥法。采用此种方法, 系先将整粒谷物样品放入烘箱内干燥, 而后将样品磨碎再在烘箱内进一步干燥。水分含量即根据所失去的水分加以确定。

样品在烘箱内要一直到恒重为止。要去除样品的全部水分而又不损坏产品，实际上是不可能的。如果样品在烘箱内停留的时间太长，则会减少有机物质，这样失去的重量可能当作失去水分的重量，使得出的数值不准确。

采用真空-烘箱方法测定含水量。测定谷物时，系先将产品磨碎并放入温度约为 212°F (100°C) 的真空-烘箱内，在该烘箱保持25mm真空度的情况下烘干5小时左右。由于使用较低的温度与较短的烘干时间，所以减少了因干物质受破坏而失去重量的可能性。

为了精确测定水分含量，必须防止样品去水后吸水。办法是在样品的上面盖上玻璃盖板，并在样品与容器都已经冷却之后再称重。

2. 蒸馏测定法——蒸馏测定法系通过谷物在油内加热而去掉水分，测定从谷物中蒸馏出来的水蒸气被冷凝成水后的体积或重量，或测定样品所失去的重量。

布朗-杜维尔蒸馏测定法是早期采用的谷物水分含量测定法之一。将整粒谷物称重之后置于油内，油加热，而后将所蒸发的水分加以冷凝，并放入量筒内计量。

官方的谷物甲苯 ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) 蒸馏测定法，要求在一个能收集冷凝水的装置内加热磨的很细的谷物，以 233°F (111°C) 温度煮沸甲苯，这样，所有水分及沸点低于此温度的其它物质则都会被蒸发。

二、间接测定法

间接测定法系对谷物由水分含量所决定的某一特性加以测定，并要求用直接测定法加以校正。间接测定法测得的水分含量通常以湿基表示。

1. 电阻测定法——物质的电阻或电导率与其水分含量有关。许多水分测定仪就是根据这一原理设计的。水分为11~16%左右的小麦，其水分含量与电阻的对数之间成线性关系。这些水分测定仪对于每种谷物都必须与标准测定法对照加以校正。因为物质

的电阻还受温度的影响，除已经作了校正外，还必须对测定时的温度变化加以校正。电阻式水分测定仪的结构很简单，测定一次不到一分钟。在压力上升时谷物的电阻下降。

水分含量高于17%时，水分含量与电阻对数之间的函数关系成抛物线。这种水分测定仪大多数指示不出7%以下的水分含量，因为这样干的谷物其电阻不因水分而变化。若测定刚由热空气所干燥的谷物，其含水量的读数比该产品的实际水分含量要低，因为水分测定仪所测定的系表面电阻。相反，如果向谷物增加水分，其含水量的读数则高于该产品的平均水分。

2. 电介质测定法——产品的电介质特性与水分含量有关。电容器的容重受放置在电容器片之间的物质的电介质特性的影响。湿物质的介电常数高，而干物质的介电常数低。

第六节 谷物的发芽率

发芽率系谷物籽实长出正常幼苗能力的一个尺度，受收获或处理过程中机械损伤的影响很大。这种损伤在很大程度上取决于谷物的水分和温度。发芽试验的方法由从事种子交易与利用的机构规定。

田间真菌对种子的发芽特性可能起有害的作用，特别是搁置在田间并曝露在恶劣的气候条件下的谷物，或种子已有破裂或有裂纹时则更是如此。这种损坏可在收获后通过种子的干燥与适当的贮藏减少到最低限度。

如果潮湿谷物在未干之前受冻，则会降低种子的发芽率。含水量在25%以上的玉米曝露在温度低于32°F 24小时发芽率就会下降，在温度4°F时，4小时也会下降。谷物发芽率低的另一个原因是在125°F 或更高的温度中贮藏的时间太长，即使水分低发芽率也会下降。

干燥温度必须保持在某一最高温度的极限之下，以免损坏谷物种子的发芽能力。谷物种子的干燥温度一般保持在110°F以下。