

低温与太阳能谷物 干燥手册

〔美〕C. K. 斯佩欧曼等编



中国农业机械出版社

低温与太阳能谷物干燥手册

〔美〕 C.K.斯佩欧曼 等编

李树春 刘秀忱 译

曹崇文 毛志怀 校

中国农业机械出版社

377641

本手册共分四章。介绍了低温谷物干燥原理，太阳能的收集、贮存及应用。它侧重于实用，并用实例加以说明。本手册还介绍了几种太阳能集热器的设计方案，可以根据实际情况进行选择和改进。

本手册可供从事谷物干燥、粮食贮藏及太阳能应用方面的科技人员参考，也可供农业大专院校的师生阅读。

**Low Temperature & Solar Grain
Drying Handbook**
C. K. Spillman, etc.
Midwest Plan Service Iowa State
University 1980.

低温与太阳能谷物干燥手册

〔美〕C.K.斯佩欧曼 等编

李树春 刘秀忱 译

曹崇文 毛志怀 校

责任编辑：孙 瑞

封面设计：刘 代

中国农业机械出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

交通印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092¹/₃₂·印张6³/₄·字数145千字

1987年7月北京第一版·1987年7月北京第一次印刷

印数0,001—1,160·定价：1.65元

统一书号：15216·255

译 者 序

《低温与太阳能谷物干燥手册》是由美国农业部和伊里诺斯大学等十二所院校合编的。该书着重介绍了低温谷物干燥原理；太阳能的收集、贮存、应用及不同类型太阳能集热器的设计方案。这些方案可根据实际情况进行选择和改进。本手册侧重于实用，提出了很多新的，有指导意义的试验研究数据和措施，并用实例加以说明。

本手册1980年2月出版之后，曾两次重印。编者把多年来在美国中北部地区对低温谷物干燥及太阳能利用的实践经验汇总成册，这些经验也适用于我国东北及华北地区，为使读者了解这些内容，译者根据1983年版本翻译了本书。

本手册第一章，第二章由刘秀忱译；第三章，第四章由李树春译，附录由李笑光，刘秀忱译，曹崇文、毛志怀对本手册进行了认真校对。并得到郭献亭的帮助，特此致谢。

由于我们的水平有限，书中难免存在错误或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

译者

1985年8月

前 言

本手册由两个基本独立的部分组成：低温谷物干燥与太阳能干燥。

低温谷物干燥在美国中北部地区已经应用了几十年。当前的工作是对合理的管理与使用加深了解，以减少对矿物燃料和电能的依赖。

本手册为我们提供了低温谷物干燥原理，并介绍了在美国中北部地区的应用。同时提出了在什么时候和什么条件下，才能应用辅助加热。并着重叙述了如何利用太阳能进行加热。

根据当前的经验和技術，本手册全面的阐述了太阳能的收集、贮存和应用原理。这些原理用在许多农场的用热方面，其中包括谷物干燥，并提出了一些明确的建议。

本手册介绍了几种不同类型的太阳能集热器的设计方案。这些方案是一些范例，根据实际情况进行多种选择和改进。

虽然太阳能人人可取，但是使用太阳能的必要设备却不是很简单，太阳能系统的经济效益还难以评价。首先，费用是随热能的利用情况、自制设备的多少和获得政府支持的可能性等情况而变化的。其次经济效益是以省下的燃料价格多少来计算的。正象手册中所写到的那样，燃料价格变化很快，以致对效益的任何估计都是有疑问的。

本手册得到美国农业部所属的农业研究、科学和教育部

VI

门的支持，并得到能源部的资助。与所有美国中西部计划服务处的项目一样，由一个工程师地区委员会提供资料，并领导了编写工作。

本手册的编者都是研究和推广方面的农业工程师，他们对谷物干燥或太阳能利用具有丰富的经验。并把在美国中北部地区多年来的实践经验汇总成最佳建议。正如任何技术一样，一些观点和建议还在不断发展完善。

当您在研究关心的某些章节之前，最好翻阅一下全书。本手册包括了近年来的很多新技术，对您来说，有些体系和管理方案可能是新东西。对后面章节内容的大致了解，会有助于您对某些章节的理解和认识。

目 录

译者序

前言

第一章 低温干燥	1
第一节 低温干燥原理	4
一、谷物的平衡水分	4
二、霉菌生长和谷物的损失	6
三、仓内谷物干燥过程	9
第二节 气流	11
一、气流——低温干燥的关键	11
二、气流阻力和静压	16
第三节 风机	17
一、风机的类型	17
二、风机的性能	19
三、影响风机选择的条件	23
第四节 风机与低温干燥仓的匹配	24
第五节 低温干燥系统的使用	31
一、装仓方法	31
二、联合干燥	39
三、风机使用	41
四、潮湿季节湿玉米处理	45
五、低温干燥系统的使用要点	45
第六节 辅助加热	46
第七节 搅拌与低温干燥	48
第二章 利用太阳能干燥谷物	50

第一节 加热空气搅拌干燥	50
第二节 高温干燥	51
第三节 干燥剂系统	51
一、所需设备	52
二、干燥剂系统管理	53
第三章 太阳能基本原理	60
第一节 可利用的太阳能	61
一、昼夜循环	61
二、季节	62
三、大气层的影响	64
四、集热器表面方位	66
五、太阳辐射表说明	69
六、集热器荫蔽	70
第二节 集热器类型	72
一、平板型集热器	73
二、聚焦型集热器	77
三、带反射板的平板集热器	78
第三节 平板型集热器材料	79
一、罩盖材料	79
二、吸热体材料	85
三、绝热材料	89
第四节 效率	92
第五节 太阳能贮存	95
一、显热贮存	96
二、潜热贮存	98
三、热贮存应用	99
四、干燥剂材料	100
第六节 太阳能系统	102
一、被动系统	102
二、主动系统	104

第七节 平板空气型集热器	107
一、结构	107
二、集热器尺寸	108
第八节 成本估算	114
一、初始成本	114
二、全年成本	114
三、收益	115
第四章 太阳能集热器方案	118
第一节 石块热贮存集热器	119
第二节 移动式集热器	122
一、伊里诺斯州立大学集热器	126
二、普度大学集热器	127
第三节 独立式集热器	130
一、瓦垄式吸热体集热器	133
二、波皱式吸热体集热器	133
三、太阳能集热器可调支架	135
第四节 带太阳能屋顶的机房	139
第五节 墙壁贮热集热器	145
一、构造	149
二、操作说明	150
三、系统性能	150
第六节 抱合式太阳能集热器	151
附录	157
一、表22, 晴天太阳每小时辐射量	158
二、表23, 平均太阳辐射量	181
三、表24, 静压	195
四、国际单位制(公制度量标准)换算表	196
五、缩写、符号、面积和体积	199
六、太阳能术语汇编	200

第一章 低 温 干 燥

在这本手册里，低温干燥指的是一种利用自然空气或只加热几度（ $2 \sim 10^{\circ}\text{F}$ ）的空气进行的缓慢的干燥过程。由于谷物在同一个仓内进行干燥和贮存，因此这个过程有时被称为贮仓干燥。低温干燥还被叫做深床干燥，它也是仓内干燥的一种方法。

干燥仓通常带有通风地板，并配备一个至少能够提供 $1\text{cfm/bu}^{\ominus}$ 风量的风机和 1ft^2 面积风量为 $1000\text{ft}^3/\text{min}$ 的出风口。建议每一个仓的顶部安装一个粮食均布器，以便使谷物均匀铺平，如图 1-1 所示。有时可设置一个搅拌器，但也可以不安装。

谷物干燥依赖于空气对谷物中水分的蒸发能力，因此空气的相对湿度是谷物干燥的关键因素。干燥用的空气相对湿度越低，从谷物中蒸发出的水分就越多，因而谷物的终了含水量也就越低。人们把空气使谷物脱水的能力叫做“干燥潜力”。“干燥潜力”受相对湿度和温度的双重影响。

干燥用的风机能使空气升温，并降低其相对湿度。当增加风机马力时，空气的热量也随之增加。此外时常需要对空气另外加热，有时是用太阳能集热器来加热的。

干燥是否采用辅助加热取决于本地区空气的“干燥潜力”和所要求的谷物最终含水量。通常在美国中北部地区的玉

$$\ominus \quad 1\text{bu} = \frac{1}{27498} \times 10^6 \text{L.}$$

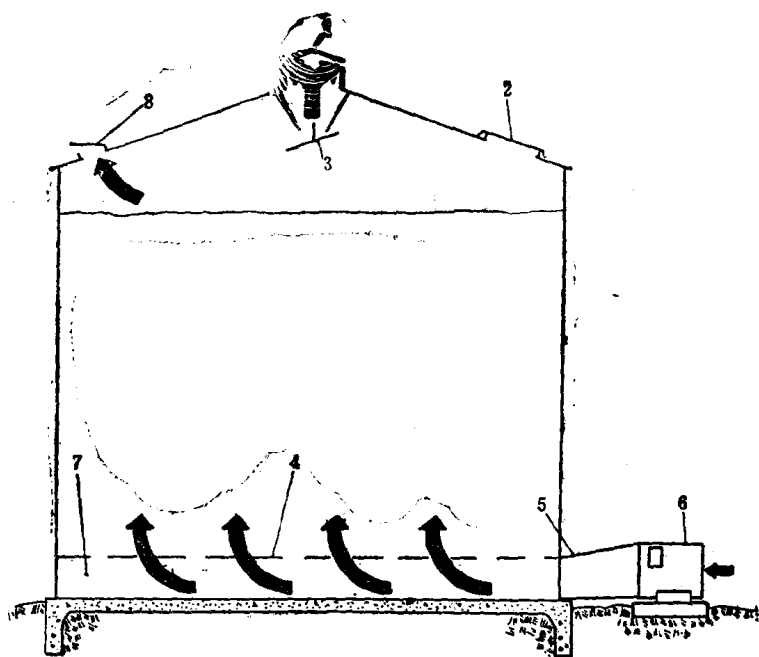


图1-1 标准的干燥仓

1—仓顶盖 2—天窗 3—均布器 4—通风地板 5—进风口 6—轴流风机 7—压力通风室 8—顶部出风口

米干燥过程中，空气经过风机得到的热量足以使玉米干燥（详见“谷物的平衡水分一节）。在秋季干燥期间，一般情况下，十年有九年把玉米干燥到冬季安全贮藏所需的含水量（含水量为18%或更低些）。有些年，为达到长期安全贮藏的含水量（13%~14%），需要在春季进行干燥。

没有搅拌装置辅助加热会引起低温干燥中过分干燥造成经济损失：

- ⊖ 对玉米低温干燥的研究最多，因此书中对玉米有详细介绍，虽然其它谷物的低温干燥与玉米类似，但目前推荐的资料不足，有关资料可参考表23。

(1) 这是因为出售的二等玉米没有达到最大允许的含水量。

(2) 过分干燥消耗了额外的能量。

估计玉米含水量在15.5%以下，过分干燥每降低1%的水分，增加的成本占玉米售价的2%，那么当每蒲式耳玉米售价为2.5元时，干燥到含水量13.5%，每蒲式耳玉米损失为10美分（ $2\% \times 2 \times 2.5 \text{ 美元} = 10 \text{ 美分}$ ）。关于辅助加热详见本章“第二节气流——低温干燥的关键”和“第六节辅助加热”。

是否采用辅助加热与风机选择和使用无关。参见本章“第四节风机与低温干燥仓的匹配”和“低温干燥系统的使用”。

如果低温干燥系统设计得合理，使用得妥当，那么它将是一种经济的、高效能的谷物调质方法，使谷物干燥质量好。它可用于大小农场，有关系统和各种农场企业。它能够：

(1) 为牧场提供作为种植饲料并销售剩余饲料的干燥装置。

(2) 为小规模谷物农场买卖提供最廉价的干燥装置。

(3) 提供高低温联合干燥装置，是用来提高高温干燥能力的一种方法。

(4) 为配有设计优良的多仓装置的农场提供主要的干燥装置。

低温干燥的优点：

(1) 谷物装卸量最小。

(2) 谷物质量好（没有应力、裂纹、容重较高）。

(3) 对石油燃料的依赖性小。

(4) 因为低温干燥从自然空气中得到热量，所以热效率高（每去1磅水只需极少的热量）。

低温干燥的缺点：

- (1) 谷物装仓时含水量受到限制。
- (2) 需要电功率大（连续用电）。
- (3) 对气候依赖性较大。
- (4) 可能使装填速度受限制。

第一节 低温干燥原理

一、谷物的平衡水分

由于谷物很容易将它的水分释放到空气中去，所以谷物干燥可采用低温。田间茎秆上的玉米干燥与玉米籽粒在仓中干燥的原理相同，不同处只是仓内玉米必须用风机强迫通风。当空气被迫通过谷物时，谷物中的水分就会被带走。

干燥需用的空气在某一温度和其相对湿度对谷物来说，都有一个相对应的水分含量。如果空气温度和相对湿度保持不变，那么谷物最终会达到接近表1里所示的——谷物与空气相平衡的含水量（即“平衡水分”）。表1列出了玉米籽粒的“平衡水分”。

谷物在干燥过程中，空气的温度和相对湿度不是恒定的。在整个干燥期间，根据平均温度和相对湿度即可确定出谷物干燥终了的含水量。表1给定的仅仅是用自然空气进行干燥处理才能达到的谷物最终含水量。

例1：如果室外平均温度为50°F，空气相对湿度为70%，问这种空气能使玉米干燥后的含水量为多少？

答：能使干燥后的含水量为15.4%

注意温度的影响。相同的相对湿度，当空气温度比较高

表1 玉米籽粒的平衡水分

温 度 °F	相 对 湿 度 %								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	—平衡水分 %—								
20	9.4	11.1	12.4	13.6	14.8	16.1	17.6	19.4	22.2
25	8.8	10.5	11.9	13.1	14.3	15.6	17.1	19.0	21.8
30	8.3	10.1	11.4	12.7	13.9	15.2	16.7	18.6	21.1
35	7.9	9.6	11.0	12.3	13.5	14.8	16.3	18.2	20.8
40	7.4	9.2	10.6	11.9	13.1	14.5	16.0	17.9	20.5
45	7.1	8.8	10.2	11.5	12.8	14.1	15.7	17.6	20.5
50	6.7	8.5	9.9	11.2	12.5	13.8	15.4	17.3	20.2
55	6.3	8.2	9.6	10.9	12.2	13.5	15.1	17.0	20.0
60	6.0	7.9	9.3	10.6	11.9	13.3	14.8	16.8	19.7
65	5.7	7.6	9.0	10.3	11.6	13.0	14.6	16.5	19.5
70	5.4	7.3	8.7	10.0	11.4	12.7	14.3	16.3	19.3
75	5.1	7.0	8.5	9.8	11.1	12.5	14.1	16.1	19.1
80	4.9	6.7	8.2	9.6	10.9	12.3	13.9	15.9	18.9
85	4.6	6.5	8.0	9.3	10.7	12.1	13.7	15.7	18.7
90	4.4	6.3	7.7	9.1	10.4	11.9	13.5	15.5	18.5
95	4.1	6.0	7.5	8.9	10.2	11.7	13.3	15.3	18.4
100	3.9	5.8	7.3	8.7	10.0	11.5	13.1	15.1	18.2

注：表中带虚线数字表示文中举例数据〔由丘-佛斯特(Chung-Pfost)方程推导，ASAE会刊76~3520。〕

时，能使谷物的含水量较低。只要温度在冰点以上，湿度较高的干燥空气也能够使较湿的谷物干燥（湿谷物含水量大约为24%）。

辅助加热可提高空气温度和降低它的相对湿度。当给空气加热时，利用表1可以估算出玉米的最终含水量。对于空气每加热5°F其相对湿度降低10%。

例2：在例1里，室外温度为55°F，相对湿度为70%。如

377641

果将温度提高 5°F ，玉米干燥终了的含水量将是多少呢？

答：温度为 55°F 时，对应的相对湿度降到60%，那么玉米干燥终了的含水量将为13.5%。

表1对确定谷堆内部的空气状态也是有用的。了解这些情况，便于判断谷物贮藏的可能性。这部分在第一章第一节“霉菌生长和谷物的损失”里给予更多的介绍。

例3：如果谷物含水量为20%，空气温度为 50°F ，那么谷物内部空气相对湿度是多少？

答：空气相对湿度大约是90%。

当相对湿度很高的空气长时间地通过谷物时，会使谷物吸湿。但在整个干燥期间，平均温度和相对湿度可以避免吸湿后的谷物含水量高于17%。并能够预料玉米回湿水分大约低于表1给定的平衡水分1%左右。如果空气能将湿谷物干燥到含水量为18%，那么它也能将干谷物吸湿到含水量17%或16%。

吸湿有时有助于低温谷物干燥。例如，在早秋季节空气是比较干燥的，而且气温比较高，这两个因素会引起谷仓下部的谷物过干。

当冬季到来时，空气相对湿度增大，气温下降。在这样的条件下，谷物基本上不能再被干燥了。可是，当这种空气从过干的下层谷物穿过时，过干谷物吸收了空气中的水分，干燥继续向上层进行。在雨天和雾天里，过干谷物可使空气解湿，因而缩小了昼夜间空气相对湿度的差值，使得干燥过程能在夜间继续进行。故此，干燥期间如果发现仓顶部有湿玉米（大约含水量大于18%）风机应继续工作。

二、霉菌生长和谷物的损失

霉菌是引起谷物损失的主要原因。影响谷物质量的霉菌

有两类：“田间霉菌”和“贮藏霉菌”。

当谷物还在田间生长的时候就受到“田间霉菌”的侵犯。一般地说：它们生长在温度为30~90°F高含水量的谷物里（谷物含水量比30%高）。低温干燥仓顶部谷物温度低，含水量高与田间的条件相类似，因此低温干燥仓顶部的那部分谷物损失是由“田间霉菌”造成的。当温度降到40~50°F时，霉菌的活动能力减弱，避免了霉变。谷物一旦干燥，“田间霉菌”就处于休眠状态或死亡。

当谷物含水量低于“田间霉菌”生长所需量时（大约低于20%），贮仓里的“贮藏霉菌”则处于支配地位。表2给定的谷物安全贮藏的含水量是由霉菌生长要求的含水量和温度确定的。因为温度和含水量对霉菌生长的影响是相互联系的，所以当通风合理，管理得当和仔细观察的情况下，贮藏温度又低于40°F时，谷物含水量能够比较高。对于夏季长期贮藏，安全贮藏含水量则比较低。

控制谷物温度和含水量可抑制霉菌生长，还可以干燥谷

表2 通风时，优质谷物安全贮藏含水量

谷 物	最大安全含水量
玉米籽粒和高粱	
春季销售的二等玉米或高粱	15.5%
贮藏1年	14%
贮藏1年以上	13%
大 豆	
春季销售	14%
安全贮藏1年以上	12%
小 麦	13%
小粒谷物(燕麦、大麦等)	13%
向日葵	9%

物而不造成大的损失。谷物的温度和含水量确定了谷物的安全贮藏期（AST）——谷物在损失前所能保存的时间。表3给定了玉米籽粒的安全贮藏期（安全贮藏期对于其它谷物尚未推荐）。安全贮藏期给定的是在谷物变质前必须把它干燥好的估计时间和贮藏中能保持谷物质量的估计时间。安全贮藏期是在特定温度和含水量状况下，由于谷粒霉变发生而使谷物下降一个销售等级所需的时间。

表3 玉米籽粒安全贮藏期

谷物温度°F	玉米水分%						
	-----天 数-----						
30	648	321	190	127	94	74	61
35	432	214	126	85	62	49	40
40	288	142	84	56	41	32	27
45	192	95	56	37	27	21	18
50	128	63	37	25	18	14	12
55	85	42	25	16	12	9	8
60	56	28	17	11	8	7	5
65	42	21	13	8	6	5	4
70	31	16	9	6	5	4	3
75	23	12	7	5	4	3	2
80	17	9	5	4	3	2	2

注：虚线括起来的数据为文中举例数据（选自汤姆森（Thompson）ASAE会刊333~337 1972）。

注意，在特定温度下谷物含水量增加，干燥和贮藏的安全贮藏期缩短。同样当温度上升时，安全贮藏期也缩短。安全贮藏期大致变化情况是，温度每升高10°F，安全贮藏期缩短一半，谷物含水量每增加2%，安全贮藏期缩短一半。机械损伤对安全贮藏期也有影响。清洁的谷物和种子抗菌能力