

牧草

干燥理论与设备

MUCao

Ganzao Lilun Yu Shebei



郑先哲 王忠江 金长江 编著
汪 春 主审

 中国农业出版社

牧草干燥理论与设备

郑先哲 王忠江 金长江 编著
汪 春 主审

中国 农业 出版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

牧草干燥理论与设备 / 郑先哲, 王忠江, 金长江编著.
北京: 中国农业出版社, 2009. 3
ISBN 978 - 7 - 109 - 13384 - 6

I. 牧… II. ①郑…②王…③金… III. 牧草-干燥
IV. S540. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 014895 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

责任编辑 姚 红

北京印刷一厂印刷 新华书店北京发行所发行
2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 6.75

字数: 200 千字 印数: 1~1 000 册

定价: 25.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

摘 要

本书介绍了我国牧草干燥技术研究及设备应用现状；阐述了代表性牧草苜蓿干燥特性；重点分析了干燥条件对牧草品质的影响；引入改进的 G. Murphy 定理，确定过程参数的相似准则和提出干燥机性能的经验公式；运用流体动力学理论模拟干燥机内部的温度和气流的分布；将理论分析和基础研究的成果应用到实践中，分别设计了实用的三重、四重滚筒牧草干燥机和控制系统，制造出四重滚筒式牧草干燥机。

本书适合牧草加工领域的科研人员参考使用。

前 言

我国畜牧产业迅速发展的需求，国家生态建设、农业产业结构调整等有关政策支持是我国牧草产业高速发展的重要因素。人工干燥是牧草收获后必要处理环节，可以实现牧草的高效、保质和现代化模式生产。本书内容是在以下科研项目资助下完成的：

1. 国家科技支撑计划项目：优质草生产和现代工业化养殖技术装备研究与开发（2006BAD11A0902）。

2. 黑龙江省留学归国人员科学技术专项资金：远红外节能型滚筒牧草干燥机及附属系统的研究（LC07C26）。

3. 黑龙江省人事厅留学回国人员择优资助项目：四重滚筒式牧草干燥机研制。

4. 东北农业大学科技创新项目：四重滚筒式牧草干燥机研究及草产品开发（CX006—3）。

5. 东北农业大学人才基金资助项目：牧草干燥特性及滚筒式牧草机研制。

本书共分为 9 章内容。本书的第 1 章绪论，详细介绍了我国目前牧草干燥领域的技术现状、存在的问题，指出了发展我国牧草干燥产业的必要性和对策。在第 2 章，重点阐述了以苜蓿为代表的牧草干燥特性方面的研究成果，这方面的研究为分析苜蓿干燥品质及干燥设备设计提供了重要理论依

据。分析干燥条件对苜蓿的营养成分、颜色和水分差异等品质指标影响规律,提供评价干燥后苜蓿品质的方法,是生产高品质牧草的技术保证,在本书的第3章对这方面有详细介绍。在第2、3章的牧草干燥基础研究成果上,第4章分析了热风速度、干燥温度、喂入率等重要参数指标对单滚筒牧草干燥机性能特性影响,从而确定牧草干燥的合理干燥机参数组合和工艺流程。第5章内容是本书的特色,在改进的G. Murphy定理指导下,提出新的研究滚筒牧草干燥机性能的实验方法,获得了牧草干燥相似准则和经验公式,可以有效的把研究结果推广到相似或者系列机型中,这是其他方法所不具备的功能。在本书的第6章,根据流体动力学理论,用CFD软件模拟了干燥过程中,四重滚筒干燥机内部的气流温度和速度分布状态,为优化干燥机结构和干燥过程提供依据。在本书的最后三章(7、8、9章),将理论分析和基础研究的成果应用到实践中,分别设计了实用的三重、四重滚筒牧草干燥机和控制系统,制造出四重滚筒式牧草干燥机。

在本书成书过程中,东北农业大学的王忠江博士撰写第2章、第7章和第9章内容;东北农业大学的金长江博士生撰写了第3章、第6章内容;其余的内容由东北农业大学的郑先哲教授撰写,并负责统稿工作。全书由黑龙江八一农垦大学的汪春教授主审。本书中的第6章内容参考了刘柏青工程师的硕士论文内容,表示感谢。

由于水平和条件所限,全书还有不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 我国发展牧草加工业意义和现状	1
1.2 发展牧草加工业的必要性	3
1.3 我国牧草干制技术现状	5
1.4 干草加工调制的常用技术	10
1.5 我国目前牧草干燥加工存在的问题	16
2 苜蓿干燥特性研究	17
2.1 研究苜蓿干燥特性的意义	17
2.2 苜蓿干燥特性	19
2.3 提高苜蓿干燥速度的方法	28
2.4 压扁处理对苜蓿干燥速率的影响	34
2.5 苜蓿薄层干燥速度经验公式的确定	38
2.6 苜蓿脱水活化能计算	44
3 干燥后苜蓿品质研究	46
3.1 饲用干苜蓿品质评价内容	46
3.2 干草调制过程中营养物质的变化	49
3.3 人工干燥后苜蓿品质的变化	53
3.4 苜蓿干燥后品质评价	62

4 滚筒式牧草干燥机性能的试验研究	78
4.1 性能指标的测试和计算	79
4.2 滚筒干燥机内部热风温度与流量分布	82
4.3 试验方案和试验过程	85
4.4 干燥机操作参数与单位能耗关系的研究	91
5 基于量纲分析方法的滚筒式牧草干燥机参数研究	95
5.1 滚筒式牧草干燥试验参数相似准则建立	98
5.2 π 项应用规则	100
5.3 试验方案确定	100
5.4 改进的 G. Murphy 定理	104
5.5 试验数据处理	105
5.6 干燥后苜蓿含水率与干燥参数关系	110
5.7 π 项的模型推广功能	112
6 滚筒干燥机内气固两相流运动的理论分析	115
6.1 流体模拟软件简介	115
6.2 气固两相的数学模型	118
6.3 两相流间的作用力	122
6.4 边界条件与初始条件	124
6.5 控制方程的离散	125
6.6 数值模拟的分析步骤	132
6.7 网格技术	133
6.8 模拟结果分析	136
7 三重滚筒式牧草干燥机设计	146
7.1 牧草干燥器类型	146
7.2 国外牧草干燥的发展状况	151

7.3	我国牧草高温干燥现状	152
7.4	三重滚筒牧草烘干机	155
7.5	三重滚筒牧草烘干机的设计	159
8	四重滚筒牧草干燥机设计	171
8.1	牧草干燥的工艺流程	171
8.2	四重滚筒干燥机工作过程分析	172
8.3	牧草段在干燥滚筒内的受力和运动分析	173
8.4	滚筒干燥机的设计	174
9	滚筒式牧草干燥机模糊控制方法	185
9.1	模糊控制简介	185
9.2	滚筒式干燥机模糊逻辑控制器的设计	188
9.3	滚筒式干燥机的模糊逻辑控制过程	193
	参考文献	197

绪 论

1.1 我国发展牧草加工业意义和现状

随着我国种植业结构的调整和畜牧业的快速发展,种草养畜已成为许多地方畜牧业发展新的增长点。一些地区利用粮棉调减出的耕地种植牧草,发展草食家畜。这对于优化农业和畜牧业结构,促进传统项目向优势产业转变,起了积极的推动作用。要使种草养畜得到健康发展,除了因势利导、科学规划外,必须重视发展牧草加工业。有了牧草加工业的发展,才能充分发挥种草养畜的经济效益。目前,我国草业中的一个重要分支——苜蓿种植和加工产业近两年发展势头强劲,据统计,2003年全国苜蓿种植面积达213.3万 hm^2 ,比2001年增长了32%,苜蓿草产品产量比2001年增长了50%。苜蓿产业还因较高的综合效益而日益受到社会关注。

有“牧草之王”美誉的苜蓿为豆科优质牧草,因其具有极高的饲草品质、经济价值和生态适应性,自古以来就在世界各地广为种植,也是世界最为重要的牧草之一。在农业发达的美国,苜蓿是种植面积最大的四种作物之一,种植面积为1000万 hm^2 。美国每年从苜蓿草粉和草捆的出口中就获利4940万美元,在加利福尼亚州,种植苜蓿的经济效益仅次于葡萄。我国种植苜蓿的历史已有2100多年,目前它是我国发展最为迅猛、种植面积最大、最具经济价值的牧草种类。

巨大的市场潜力和较高的经济收益是我国苜蓿产业近两年高

速发展的主要动力。据有关专家介绍,我国国内苜蓿草产品的市场容量每年大约为1 000万t,与我国相邻的东亚和南亚每年大约有300万t的优质苜蓿草产品需求量,而我国苜蓿草产品的年产量目前还不足20万t,市场缺口很大。苜蓿产量较高,栽培管理措施如果到位,每亩苜蓿每年可产1t左右的干草。而苜蓿干草产品的国际市场价格目前大约为每吨150~200美元,国内市场价格大约为每吨500元人民币左右。种植苜蓿在劳动力、化肥、农药等方面的投入很低,所以种植苜蓿的收益要远远高于一般的大田作物。

国家生态建设、农业产业结构调整等有关政策支持是我国苜蓿产业高速发展的另一个重要因素。一方面,苜蓿良好的生态适应性使其能够在我国北方一些生态恶化的地区正常生长;另一方面,苜蓿较高的经济收益又使其在农业产业结构调整中不逊于其他作物。所以,近两年在我国华北、东北和西北地区都迅速涌现了一批苜蓿产业基地甚至苜蓿产业带。例如,甘肃省张掖市借助黑河流域水土治理工程项目,大力发展苜蓿产业,目前该市的苜蓿种植面积已达2万hm²,通过种植苜蓿不仅使大量荒芜多年的戈壁滩重新披上了绿装成为可利用的土地,当地不少农民也因种植苜蓿增加了收入,成功实现了农业产业结构调整。

尽管我国苜蓿产业近两年取得不俗的成就,但业内人士指出:我国苜蓿产业目前仅具备产业化雏形,还远未达到产业化的规模和品质,我国苜蓿产业要走的路还很长。首先,我国苜蓿产区的规模都不是很大,一般认为年产量达到3万t的生产规模才可能进行产业化经营,但目前我国达到这个规模的企业不多;其次,我国苜蓿产品没有统一的质量标准,产品质量和产量都不稳定,很难走向国际市场;第三,我国苜蓿产品的市场体系尚未形成,没有行业协会组织协调,也没有龙头企业带动,所以面对国内外巨大的市场目前还很难把握。科技含量低也是我国苜蓿产业健康发展的一大软肋,目前有许多苜蓿种植项目都因缺乏科学论

证和管理而走了弯路，在苜蓿种植、收割和加工等各个环节缺乏相应的技术规程，造成产品质量上不去，严重影响了后期的销售和经济效益。

1.2 发展牧草加工业的必要性

发展牧草加工业有以下 3 方面的必要性：

1. 采用科学的牧草加工调制方法不仅可以保持牧草原有的营养价值，而且还可提高牧草的利用价值。如牧草经青贮加工后，既保持了青绿饲料原有的鲜态和大部分营养，又具有蒿香的酸味，柔软多汁，适口性好，能刺激家畜食欲、消化液的分泌和肠道蠕动，从而增强了消化功能。优质的青干草粉营养丰富，含可消化蛋白质为 16%~20%，还含多种维生素、微量元素及其他生物活性物质等，可成为蛋白质、维生素补充饲料，其作用优于精料。在配合饲料中加入一定比例的青干粉，对畜禽健康和生产性能都有较好的效果。

2. 牧草加工可以保证畜禽牧草饲料全年均衡供应。我国草地牧草生产与家畜对草料的需求之间存在着严重的季节不平衡。如在寒冷的冬季，牧草在数量上和质量上均不能满足家畜的需求，如果在夏季牧草生长旺盛的季节，将多余的牧草进行加工调制，在冬季供给家畜，如同一年四季都可采食到青绿饲料，从而使家畜常年保持高水平的营养状态和生产水平。

3. 发展牧草产业有利于种草与养畜的协调发展，有利于实现牧草业产业化。在发展种草养畜的过程中，如果牧草加工业不同步发展，必然会出现种草与养畜的供求矛盾。一方面，种草与养畜有着各自不同的影响因素，具备种草条件的地方，未必适合养畜，养畜发达的地方，不一定具备种草的条件；另一方面，种草与养畜相比，资金投入相对少些，种草的农户未必都有资金投入养畜，有资金投入养畜的农户，自己所种的草未必能满足养畜的需要。因此只有通过发展牧草加工业这个龙头，建立起牧草产

品的销售市场,实现种—加—销一条龙经营,才能很好地解决种养之间的供求矛盾,促进种草与养畜的合理布局和协调发展,才能促使各自的经济效益最佳化。那样,种草未必要养畜,养畜也未必要种草。

据日本《畜产杂志》介绍,日本每年需要进口 200 t 各类草产品,随着韩国经济的复苏,其市场前景极为可观。估计韩国潜在的市场规模是 50 万~80 万 t 的草颗粒、干草、草块和禾本科牧草干草捆。由于中国具有地缘优势,为牧草产品的生产创造了良好的市场机遇与条件。黑龙江垦区计划每年至少要种植 1.3 万 hm^2 牧草,吉林省、江苏省、北京市及西部的大部分省份都大幅度调整种植结构,大力发展牧草产业。东南亚一些国家和地区对苜蓿草产品的需求量也非常大。同时,大多数富裕的伊斯兰国家农业资源贫乏,也是当今世界的主要消费市场之一,如沙特阿拉伯的麦加城,每年仅在朝觐期间的宰生节一天就要屠宰 200 万只羊,短时间内集中这么多只羊所需的饲草主要依靠进口苜蓿,这也是一个潜在的远期市场。我国主要生产的牧草产品为草捆、草粉和少量草粒。从国内市场来看,对牧草产品需求量较大的市场主要是配合饲料生产厂家和规模较大的草食牲畜饲养企业等。据有关专家分析和国外的生产实践,在各类畜禽的饲喂标准中,牧草产品在牛羊饲料中可占到 60%,猪饲料中可占到 10%~15%,鸡饲料中可占到 3%~5%。依据我国 2000 年配合饲料的产量 9 000 万 t 估算,可用于配合饲料的牧草产品潜在市场约 1 000 万~1 200 万 t 左右。同时,随着我国配合饲料产量以每年 10% 的速度增加,对牧草产品的需求量也将以每年 70 万 t 左右的速度增长。目前,已开始简单加工的牧草占人工种草资源的 5% 左右。这些牧草产品主要用于规模较大的奶牛场、赛马场及特种动物养殖场,配合饲料用草和出口的数量很少。因此,今后我国配合饲料用草和规模化养殖场用草的数量至少在 2 000 万 t 左右。另一方面,我国适宜冷季放牧的草地仅占全年

放牧草地的 24.3%，还有 75% 以上地区的牧畜冬季缺草，同时，适于刈割调制干草储备过冬的草地只占全国草地面积的 25%，而且 70% 以上分布在东部和南部湿润地区，这种地区间和季节性的不平衡将会推动我国牧草产品的发展和流通，我国当前的牧草产品流通量不足 30 万 t。

我国目前牧草产品加工较为粗糙，大部分草产品的规格和质量均无法满足国际市场的需求。如果该项目总投资 300 万元，年产草产品 2 万 t，根据对产品的预测价格和计划生产能力计算，正常年总销售额 2 000 万元，净利润 140 万元，投资报酬率近 50%，项目经济收益良好，投资回收期两年多。牧草加工发展还可以促进牧草种植业和畜牧养殖业的发展。牧草可改良土壤，保护水土资源，改善生态环境，实施农业可持续发展。种草还可以促进退耕还草，其社会效益就更不言而喻了。

1.3 我国牧草干制技术现状

干草是指利用（在适宜时期）收割的天然草地或人工种植的牧草及禾谷类饲料作物，经自然或人工干燥调制的能长期保存的草料。干草的特点是营养性好、容易消化、成本比较低、操作简便易行、便于大量贮存。在草食家畜的日粮组成中，干草起到的作用越来越被畜牧业生产者所重视，它是秸秆、农副产品等粗饲料很难替代的草食家畜饲料。新鲜牧草只限于夏秋季节应用，制成干草可以一年四季都用。因此，制成干草有利于缓解草料在一年四季中供应不均衡的矛盾，干草也是制作草粉、草颗粒和草块等其他草产品的原料。制作干草的方法和所需设备可因地制宜，既可利用太阳能自然晒制，也可采用大型的专用设备进行人工干燥调制，调制技术比较容易掌握，制作后使用方便，是目前常用的饲草加工保存的有效方法。

牧草收割后要制成干草就需要进行干燥，干草的调制方法主要有三种，即自然干燥法、人工干燥法和物理化学干燥法。自然

干燥法不需要特殊的设备，成本低，但易受自然气候条件的制约，而且劳动强度大，效率低，调制的干草质量差一些。人工干燥法则是利用一定的干燥设备来调制干草的方法，这种方法可以克服自然干燥法对天气状况的依赖，并减少微生物、生理生化过程、雨淋和枝条折断等因素对干草质量的影响，但人工干燥法的成本高。物理化学干燥法就是利用物理手段和在草中添加化学物质的方法加快牧草干燥。

在加拿大、澳大利亚、美国等国家，牧草加工早已成为一项重要的饲料产业。我国的东北农业大学、中国农业大学、东北大学等高校院所在吸收国外先进技术基础上，通过多年的理论研究和科学实验，创新性研制出了先进、实用的饲草秸秆揉切、烘干、压块成套技术与设备。但我国目前绝大部分的牧草脱水干燥还采用田间晾晒方法。牧草在营养丰富期，通常水分在 70% 以上，要保证牧草的营养价值，必须做到在牧草营养的丰富期迅速脱水加工，最大限度的保持营养成分和安全储存，才能有效地提高牧草的采食率和消化率，从而提高牧草的商品价值，也便于长途运输和出口。而目前我国采用人工自然晾晒，营养损失高过 50%~60%，使牧草所含维生素、叶绿素、有机酸等营养遭到严重破坏，造成不必要的经济损失，因此有必要对牧草进行高温快速干燥脱水。高温快速干燥法是利用烘干机将牧草水分快速蒸发掉，含水率很高的牧草在烘干机内经过几分钟或几秒钟，其水分便下降到 5%~10%。此法调制干草对牧草的营养价值及消化率影响很小，但需要较高的投入，干草的成本增加。

在牧场上生长的牧草的含水率一般为 50%~80%，某些品种含水率达到 90% 以上。而能够保藏的干草，一般含水率在 15%~18%，最高不超过 20%。因此，牧草收割后，必须散发出大量的水分方可保存。牧草收割后水分散发过程可分为以下 2 个阶段：

第一，游离水散失阶段。经过 5~8h 的地面干燥，牧草的含

水率可从 80%~90%，降低到 45%~55%。这一阶段主要散失牧草内部的游离水，水分散失速度较快。

第二，结合水散失阶段。当禾本科牧草含水率降到 40%~45%，豆科牧草含水率降到 50%~55% 时，便进入结合水散失阶段。这一阶段水分散失速度逐渐减慢，含水率从 45%~55% 降到 18%~20%，需要 1~2 天。牧草干燥速度因环境温度、湿度和空气流动情况而异，因牧草的保蓄水能力而异，因生育时期和牧草部位而异。一般来讲，空气干燥、气温较高的环境有利于牧草干燥，豆科牧草干燥速度慢于禾本科牧草，茎秆干燥速度慢于叶片干燥速度。自然晾晒干草时，因呼吸作用及风吹雨淋，干物质损失 10% 左右，机械作业过程中干物质损失更大。因此，牧草干燥速度要尽量快，要减少翻草次数，晾晒时不宜堆放太厚。

自然干燥法有以下几种方式：

地面干燥法。将收割后的牧草在原地或者运到地势比较高且干燥的地方进行晾晒的调制干草的方法。通常将收割的牧草干燥 4~6 h 使其水分降到 40%~50%，然后用搂草机搂成草条继续晾晒，使其水分降至 35%~40%，再用集草机将草集成直径为 0.5~1 m 的草堆，保持草堆的松散通风，直至牧草完全干燥。

草架干燥法。在比较潮湿地区或者雨水较多的季节、地区，用地面干燥法来调制牧草会造成干草变褐、发黑、发霉腐烂。这就要在专门制作的草架子上进行干草调制。干草架子有独木架、三角架、幕式棚架、铁丝长架、活动架等。架上干燥可以大大地提高牧草的干燥速度，保证干草的品质。架上干燥时应自上而下地把草置于草架上，厚度应小于 0.7 m，并保持蓬松和一定的斜度，以利于采光和排水。

发酵干燥法。在光照时间短、光照强度低、潮湿多雨的地方，很难只利用阳光来晒制干草而必须结合利用草堆的发酵发热降低水分来共同完成牧草的干燥过程。发酵干燥法就是将收获后

的牧草先进行摊晾，使其水分降低到 50% 左右时，再将草堆集成 3~5 m 高的草垛，把草垛逐层压实，草垛的表层可以用土或薄膜覆盖，使草垛发热并在 2~3 天内使垛温达到 60℃~70℃，随后在晴天时开垛晾晒，将草干燥。当遇到连绵阴雨天时，可以保持温度不过分升高的前提下，而使发酵的时间延长。此法晒制的干草营养物质损失较大。

通常对干草场地晒制可以进行三个阶段的处理：

前期：对豆科类牧草在收割前，最好用干燥剂处理一下，这种方法适宜于人工干燥。处理时选择合适的干燥剂，按照要求配制成溶液喷洒到牧草上。试验证明，干燥剂有助于缩短新鲜饲草调制成干草的时间，降低营养物质损失。

中期：根据场地条件，对刚收割牧草采取压扁、切短等措施，主要的目的是加快牧草的干燥速度。如利用机械收割，有些收割机就包含有压扁的工序。自然干燥法中压扁干燥比普通干燥的牧草干物质损失减少 1/3~1/2，碳水化合物损失减少 1/3~1/2，粗蛋白质损失减少 1/5~1/3。

干燥晒制期：为了使植物细胞迅速死亡，停止呼吸，减少营养物质的损失，一般选晴朗的天气，将刚收割的饲草，在原地或附近干燥地铺成又薄又长的条，暴晒 4~5 h，使鲜草中的水分迅速蒸发，由原来的 75% 以上减少到 40% 左右，完成晒干的第一阶段目标。随后继续干燥，使牧草水分由 40% 减少到 14%~17%，最终完成干燥过程。在这个阶段要改变晾晒的方式，因为如果此时仍采用平铺暴晒法，不仅会因阳光照射过久使胡萝卜素大量损失，而且一旦遭到雨淋后养分损失会更多。当水分降到 40% 左右时，应利用晚间或早晨的时间进行一次翻晒，这时田间空气湿度相对较大，进行翻晒时可以减少苜蓿叶片的脱落，同时将两行草垄并成一行，或将平铺地面的半干青草堆成小堆，堆高约 1 m，直径 1.5 m，重约 50 kg，继续晾晒 4~5 天，等全干后收贮。