doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.016

不同预处理与干燥方式下苜蓿干燥特性研究

孙庆运[1,2]　韩梦龙[1]　于贤龙[1,2]　赵　峰[1,2]　贾振超[1,2]　武文璇[1,2]　张宗超[1,3]

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 2. 农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室, 济南 250100;
3. 济南市农产品产后减损智能装备重点实验室, 济南 250100)

摘要: 为解决因苜蓿初始含水率高以及干燥工艺不合理,所导致的干燥能耗高、干草品质差等问题,研究了不同预处理方式(压裂、晾晒以及挤压脱水)与干燥方式(60℃红外干燥、60℃热风干燥)对苜蓿干燥特性和品质的影响,并建立苜蓿干燥模型,确定苜蓿保质节能干燥工艺。试验结果表明,与热风干燥组相比,在不同预处理方式下红外干燥时长缩短 21.6% ~45.3%;在相同干燥方式下,晾晒预处理组由于苜蓿初始含水率低,干燥时长最短,较未处理组干燥时长缩短 70% 以上。未处理和压裂预处理方式下苜蓿红绿值 a 较低,黄蓝值 b 较高;晾晒预处理后亮度 L 和红绿值 a 均较高,黄蓝值 b 最低,色泽损失相对较大。不同干燥方式下晾晒预处理组苜蓿粗蛋白含量最高,其次是压裂预处理;晾晒预处理组苜蓿相对饲喂价值(RFV)最高,RFV 均大于 150,较未处理组提高 11.37 ~ 12.95;而挤压脱水预处理组的粗蛋白含量、相对饲喂价值均最低,品质损失最大。苜蓿最佳干燥工艺确定为晾晒预处理与 60℃红外干燥。

关键词: 苜蓿; 预处理; 红外干燥; 热风干燥

中图分类号: S375; TS205.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0177-07　　**OSID**:

Study on Drying Characteristics of Alfalfa under Different Pretreatments and Drying Methods

SUN Qingyun[1,2]　HAN Menglong[1]　YU Xianlong[1,2]　ZHAO Feng[1,2]　JIA Zhenchao[1,2]
WU Wenxuan[1,2]　ZHANG Zongchao[1,3]

(1. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Science*, *Ji'nan* 250100, *China*
2. *Huang-Huai-Hai Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Ji'nan* 250100, *China*
3. *Jinan Key Laboratory of Intelligent Equipment for Post-production Loss Reduction of Agricultural Products*, *Ji'nan* 250100, *China*)

Abstract: Due to the high initial moisture content of alfalfa and the unreasonable drying process, the problems of high drying energy consumption and poor quality of alfalfa was caused. The effects of different pretreatment methods (fracturing, sun dried, and crushing dehydration) and drying methods (infrared drying 60℃, hot air drying 60℃) on the drying characteristics and quality of alfalfa were investigated. The drying model for alfalfa was established, and the optimal energy-saving drying process was determined. The experimental results showed that the infrared drying time under different pretreatment conditions was shortened by 21.6% ~45.3% compared with that by the hot air drying method. Under the same drying method, the drying time of the sun dried pretreatment group was the shortest due to the low initial moisture content of alfalfa, which was reduced by more than 70% compared with the untreated group. The drying time of the crushing dehydration pre-treatment group was the second shortest. Under different drying methods, the red-green value of alfalfa was lower, and the yellow and blue value of alfalfa was higher in the untreated and fracturing pretreatment groups, which indicating the least color loss. The color loss of sun dried pretreatment group was relatively larger than that of others pretreatments, where the brightness value and the yellow and blue value were increased due to the loss of

收稿日期: 2025-08-20　修回日期: 2025-09-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32201691)和山东省农业科学院国际(地区)科技合作专项(CXGC2025H35)

作者简介: 孙庆运(1992—),男,工程师,博士,主要从事农产品干燥技术与装备研究,E-mail: 1049256355@qq.com

通信作者: 张宗超(1986—),男,副研究员,主要从事农产品加工装备研究,E-mail: zhangzchao@foxmail.com

chlorophyll caused by long-term drying. The crude protein content of alfalfa after sun dried pretreatment was the highest. The relative feed value (RFV) of alfalfa in the sun dried pretreatment group was the highest, with a RFV value greater than 150, which was 11.37 ~ 12.95 higher than that of the untreated group. The crude protein content and RFV value of the crushing dehydration pretreatment group were the lowest, which was due to that the alfalfa juice squeezed out and the structure of the leaves and stems significantly damaged. The optimal drying process for alfalfa was the sun dried pretreatment and 60℃ infrared drying group.

Key words: alfalfa; pretreatment; infrared drying; hot air drying

0 引言

紫花苜蓿属于多年生豆科牧草,根据区域的气候条件,1 年可刈割多茬,具有产量与营养价值均高的特点,是一种优质的饲草[1-2]。目前国内苜蓿干草调制的生产方式仍以田间晾晒为主,由于收获季雨水大以及干草捡拾过程叶片脱落,苜蓿干草品质较差[3],每年需进口优质苜蓿干草 1.1×10^7 t 以上。苜蓿收获时含水率高(≥80%),为降低苜蓿干草品质损失和干燥能耗,需开展苜蓿保质节能的干燥工艺研究。

苜蓿自然干燥时间长,且雨水和阳光等因素对牧草干草叶绿素含量和营养品质显著影响[4-5];为实现苜蓿保质节能干燥,国内外学者开展了不同干燥工艺下牧草干燥特性和品质变化研究。文献[6]提出了田间晾晒与草捆干燥相结合的牧草湿法收获干燥工艺,与传统牧草收贮工艺相比,可减少干物质损失 30%,有效营养成分保存率由 50% 提高到 90%。文献[7]研究了不同干燥方法对苜蓿干草品质、能耗和色泽的影响,微波-热风干燥方式能耗最低,色泽最佳,冷冻干燥后苜蓿品质更好。文献[8]研究了压裂和翻晒技术对苜蓿干燥特性的影响,结果表明不同处理工艺下苜蓿干燥速率均显著提高,中度压裂与 1 次翻晒为最佳处理组合。文献[9]优化了热风温度、风速和辐射距离等红外热风组合干燥工艺参数,有效保留了苜蓿营养成分,并且提升了干燥速率。关于不同干燥方式与预处理方式下苜蓿干燥特性和品质的研究较少。

本文针对苜蓿干燥作业能耗高、品质损失大的问题,以预处理方式(压裂、晾晒、挤压脱水)与干燥方式(60℃红外干燥、60℃热风干燥)为试验因素,开展苜蓿干燥特性试验研究,对比分析干燥时长、色泽以及品质的变化,并建立干燥模型,确定节能、保质的干燥工艺。

1 试验材料与方法

1.1 试验原料

试验原料苜蓿取自福建省漳州市龙海区,品种为劲能 5010,自田间收割后冷藏保存邮寄至实验室。采用 105℃烘干恒重法测定,物料初始含水率为(82.36 ± 0.1)%。

1.2 试验设备

LC-101 型电热鼓风干燥箱(上海力辰邦西仪器科技有限公司)、FRD-01 型红外干燥试验台(自制)、YS4580 型便携式色差计(深圳市三恩时科技有限公司)、MFJ 型多功能研磨机(北京利仁科技股份有限公司)、Kjeltec 8400 型全自动凯氏定氮分析仪(丹麦福斯集团公司)、ANKOMA220 型半自动纤维分析仪(美国安康科技公司)、欧式 A 型压片机(莆田市晟隆首饰工具店)、TD5000 型电子天平(上海力辰邦西仪器科技有限公司)。

设计了红外干燥试验台,主要由干燥室、红外加热系统、排湿系统以及控制系统组成,如图 1 所示。干燥室的尺寸为 54 cm × 54 cm × 50 cm,上部开进风孔,背面下方开排湿孔,加装排湿风机。红外加热系统采用碳纤维远红外灯,功率为 1 kW,与物料架的间距为 25 cm,控制系统由温度控制器、温度传感器等组成。

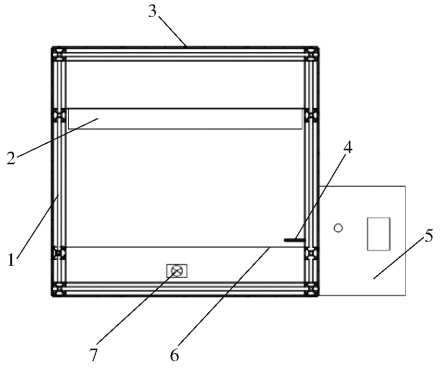


图 1 红外干燥试验台结构图

Fig. 1 Structure diagram of infrared drying oven

1. 架体 2. 远红外灯 3. 进风口 4. 控制器 5. 温度传感器 6. 物料架 7. 排湿风机

1.3 试验方法

本研究以预处理工艺和干燥方式为试验因素,研究苜蓿干燥特性、色泽和品质变化。试验前将苜蓿剪成 20 cm 段,每个料盒内的物料质量约为 50 g,各组试验重复 2 次。

1.3.1 预处理工艺

压裂预处理:苜蓿放置在保鲜袋内,用钢棒碾

压，使茎秆破裂。

晾晒预处理：将苜蓿放在塑料板上放置于日光充足处，每隔 0.5 h 称量一次质量，晾晒至含水率为 43% 左右，然后进行下一步试验。

挤压脱水预处理：将欧式 A 型压片机对辊间隙调到 2 mm，将 50 g 苜蓿一端平齐地推入对辊间隙，随着对辊旋转，苜蓿通过对辊间隙挤压脱水，一次挤压后苜蓿含水率维持在 77% 左右。

未处理组：只将苜蓿剪成 20 cm 段，不做其他处理，作为对照组，进行干燥试验。

1.3.2　干燥方式

利用电热鼓风干燥箱和自制的红外干燥试验台，物料层温度控制为 60℃，开展苜蓿热风干燥和红外干燥试验，试验工艺如表 1 所示；将预处理后的苜蓿放置于干燥室内，每 20 min 测量一次质量变化，每 60 min 翻动一次物料，直到两次称量低于 0.1 g。干燥时长以苜蓿含水率干燥至低于 13% 计算。

表 1　苜蓿不同干燥工艺试验组

Tab.1　Different drying process experimental groups of alfalfa

序号	组别	干燥方式
1	热风-未处理	60℃热风干燥
2	热风-压裂	60℃热风干燥
3	热风-晾晒	60℃热风干燥
4	热风-挤压脱水	60℃热风干燥
5	红外-未处理	60℃红外干燥
6	红外-压裂	60℃红外干燥
7	红外-晾晒	60℃红外干燥
8	红外-挤压脱水	60℃红外干燥

1.4　干燥特性参数

1.4.1　干基含水率

干燥过程中干基含水率的计算公式为

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \tag{1}$$

式中　M_t——t 时刻的干基含水率，g/g

m_t——t 时刻苜蓿质量，g

m_d——苜蓿干物质质量，g

1.4.2　干燥速率 D_R

干燥速率计算公式为[10]

$$D_R = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \tag{2}$$

式中　M_{t1}——t_1时刻干基含水率，g/g

M_{t2}——t_2时刻干基含水率，g/g

1.4.3　水分比 M_R

由于苜蓿的平衡干基含水率远小于 M_t 和初始干基含水率 M_0，水分比的计算公式可以简化为[11]

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \tag{3}$$

1.4.4　干燥模型

干燥过程的数学模型已经发展出百余种，被广泛应用于牧草、粮食、蔬菜等农作物干燥生产中。根据苜蓿干燥工艺，本文选用 3 种常用的薄层干燥模型[12-13]，如表 2 所示。

表 2　主要的薄层干燥模型

Tab.2　Main thin layer drying models

序号	名称	模型表达式
1	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
2	Lewis	$M_R = \exp(-kt)$
3	Wang and Singh	$M_R = 1 + ct + dt^2$

模型拟合度采用决定系数 R^2、均方根误差（RMSE）、残差平方 X^2 进行评价，R^2 值越接近 1 代表模型拟合程度越好，均方根误差和残差平方和越小，说明拟合程度越好。

1.5　品质分析方法

1.5.1　色泽

对干燥后苜蓿进行粉碎，利用 YS4580 型色差计对各试验组苜蓿粉进行色泽度测量，每组试验样品测量 3 次，取平均值。

1.5.2　粗蛋白（CP）含量

参照 AOAC（1990）[14] 的方法测定饲料样品中粗蛋白含量，每组试验样品做 3 次重复，取平均值。

1.5.3　纤维含量和相对饲喂价值

参照文献[15]的方法测定饲料样品中性洗涤纤维（NDF）和酸性洗涤纤维（ADF）的含量，每组试验样品做 3 次重复，取平均值。

相对饲喂价值（RFV）根据干物质采食量和可消化的干物质量计算，公式为[16]

$$C_{DMI} = 120/C_{NDF} \tag{4}$$

$$C_{DDM} = 88.9 - 0.779C_{ADF} \tag{5}$$

$$V_{RFV} = C_{DMI}C_{DDM}/1.29 \tag{6}$$

式中　C_{DMI}——干物质采食量，g

C_{DDM}——可消化的干物质量，g

C_{NDF}——中性洗涤纤维含量，%

C_{ADF}——酸性洗涤纤维含量，%

V_{RFV}——相对饲喂价值

1.6　数据处理方法

试验数据由 Excel、Origin 9.1、SPSS 27 等软件进行处理，对数据进行计算、拟合以及图表的绘制。结果中数据以“平均值 ± 标准差（SD）”的形式表示，并对数据进行显著性分析。

2　试验结果与讨论

2.1　不同干燥工艺对苜蓿干燥特性的影响

图 2 为不同预处理方式下苜蓿 60℃热风干燥特性曲线。从图 2a 中可以看出，未处理组干燥时间

最长,为 218 min。采用压裂、挤压脱水、晾晒预处理后,干燥时长均显著缩短,分别为 199、116、64 min,仅为未处理条件下的 91.3%、53.2%、29.4%。从图 2b 中可以看出,未处理和压裂预处理组干燥过程呈先匀速然后降速的趋势,挤压脱水和晾晒预处理组则为恒降速干燥过程;与对照组相比,挤压脱水预处理组干燥速率显著提高,其次是压裂预处理。

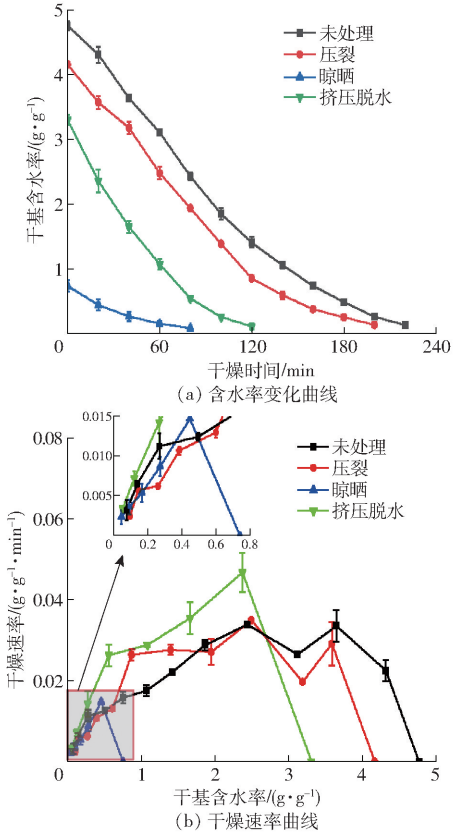


图 2 苜蓿不同预处理方式热风干燥特性曲线

Fig. 2 Hot air drying characteristic curves of alfalfa with different pretreatment methods

这是由于晾晒预处理后苜蓿初始含水率大幅降低,进而使干燥时长显著缩短,有利于干燥能耗大幅下降;挤压脱水预处理使茎秆和叶片破裂挤压出水分,降低初始含水率,且叶片和茎秆结构均严重破损,增加了表面水分以及内部水分更容易迁移,提高干燥速率;压裂预处理则主要使茎秆压裂,加速茎秆内部水分散失,干燥速率有所提高,因而干燥时长仅低于未处理组[17]。

图 3 为不同预处理方式下苜蓿 60℃红外干燥特性曲线,从图中可以看出,苜蓿不同预处理下干基含水率和干燥速率变化趋势与热风干燥相同,但红外干燥速率更高,干燥时长显著缩短;未处理、压裂、晾晒以及挤压脱水预处理下红外干燥时长分别为 150、142、35、91 min,仅为热风干燥的 68.8%、71.4%、54.7%、78.4%;与热风干燥相比,不同预处理红外干燥时长缩短 21.6% ~45.3%。这是由于红外辐射直接作用于物料内部水分,引发水分子振动产热,加速水分迁移,试验结果与咖啡叶[18]、稻谷[19]等研究结果相同。

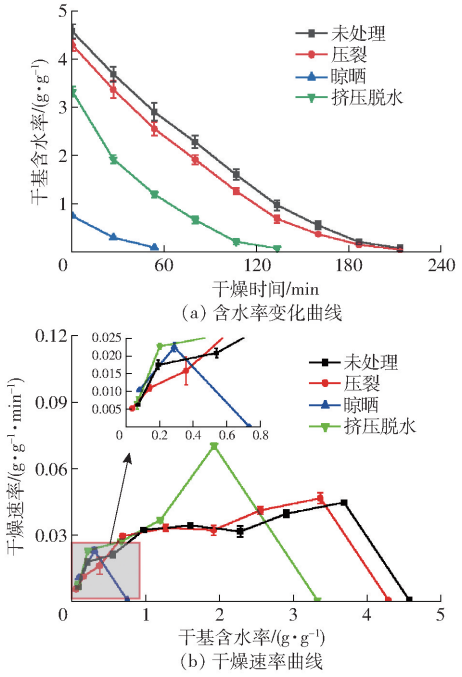


图 3 苜蓿不同预处理方式红外干燥特性曲线

Fig. 3 Infrared drying characteristic curves of alfalfa with different pretreatment methods

2.2 干燥模型的建立

从干燥模型拟合参数(表 3)可以看出,各干燥模型的决定系数 R^2 大于 0.970,拟合结果均较好,其中 Page 模型的拟合度最高,决定系数 R^2 大于 0.995,且 X^2 和 RMSE 最低,其次是 Lewis 模型、Wang and Singh 模型。表明苜蓿干燥特性曲线更符合幂指数函数,本研究与辣木叶[20]、苜蓿草捆[21]的干燥模型拟合结果相似。通过干燥模型的建立,确立了各干燥条件下水分比与时间的函数,有利于分析干燥过程中含水率的变化,Page 模型数据可以为苜蓿干燥控制系统搭建提供支撑。

为验证模型的拟合效果,选取热风-未处理组开展苜蓿干燥试验,将模型拟合结果和真实测量值进行拟合。图 4 为苜蓿热风-未处理组干燥模型验证曲线,该条件下的实际值与 Page 模型拟合值十分接近,R^2 为 0.995,证明该模型能够很好地拟合苜蓿干燥特性数据。

2.3 色泽

从表 4 中可以看出,与其他预处理方式相比,不同干燥方式下晾晒预处理组的亮度 L 和红绿值 a 均较高,黄蓝值 b 最低,表明在阳光下晾晒过程会使叶绿素下降,亮度和红绿值上升,苜蓿颜色变黄[22];挤压脱水预处理下苜蓿亮度最低,与晾晒预处理相比,红绿值较低,黄蓝值较高,色泽损失较小,这可能由

表 3　干燥模型拟合参数表

Tab. 3　Drying model fitting parameters

模型	参数	热风干燥 60℃				红外干燥 60℃			
		未处理	压裂	晾晒	挤压脱水	未处理	压裂	晾晒	挤压脱水
Page	k	9.769×10^{-4}	1.036×10^{-3}	2.053×10^{-2}	6.089×10^{-3}	2.218×10^{-3}	3.151×10^{-3}	2.704×10^{-2}	1.771×10^{-2}
	n	1.493	1.519	1.059	1.293	1.426	1.376	1.170	1.118
	R^2	0.999	0.998	1.000	0.998	0.995	0.997	1.000	0.997
	X^2	0.029	0.011	0.014	0.012	0.043	0.034	0.001	0.024
	RMSE	0.012	0.015	0.010	0.015	0.025	0.020	0.002	0.018
Lewis	k	1.014×10^{-2}	1.148×10^{-2}	2.586×10^{-2}	2.038×10^{-2}	1.467×10^{-2}	1.616×10^{-2}	4.790×10^{-2}	2.794×10^{-2}
	R^2	0.983	0.980	0.999	0.991	0.982	0.986	0.999	0.996
	X^2	0.281	0.208	0.023	0.116	0.257	0.207	0.016	0.057
	RMSE	0.066	0.064	0.013	0.039	0.060	0.051	0.015	0.022
Wang and Singh	c	-7.311×10^{-3}	-8.300×10^{-3}	-1.758×10^{-2}	-1.348×10^{-2}	-1.039×10^{-2}	-1.123×10^{-2}	-2.836×10^{-2}	-1.641×10^{-2}
	d	1.327	1.722	7.713 4	4.383	2.670	3.097	1.892×10^{-4}	6.300
	R^2	0.997	0.995	0.986	0.992	0.998	0.999	0.971	0.970
	X^2	0.085	0.046	0.104	0.172	0.180	0.001	−0.170	−0.057
	RMSE	0.021	0.027	0.043	0.316	0.014	0.015	0.061	0.066

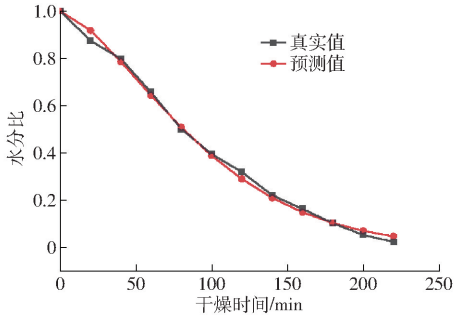


图 4　苜蓿热风-未处理组干燥模型验证曲线

Fig. 4　Drying model validation curves of alfalfa with hot air-untreated group

于挤压脱水过程中叶片中的汁液被挤出，且长时间热处理，会造成叶绿素含量下降和颜色褐变。而未处理和压裂预处理对苜蓿结构破坏较小，叶绿素含量损失最小，所以红绿值较低，黄蓝值较高。

与热风干燥相比，仅未处理组红外干燥亮度和红绿值均较低，黄蓝值较高，其余组无显著性差异，表明干燥方式对苜蓿色泽影响小于预处理方式。

2.4　粗蛋白含量

不同干燥条件下苜蓿粗蛋白含量如表 5 所示，红外-压裂组苜蓿粗蛋白含量最高，质量分数为 24.71%；晾晒预处理组苜蓿粗蛋白质量分数分别为 24.53%（热风干燥）和 24.59%（红外干燥），高于其他干燥组；挤压脱水预处理组苜蓿粗蛋白含量最低，质量分数分别为 21.88%（热风干燥）和 22.96%（红外干燥）。这可能由于苜蓿先晾晒至含水率 43%，会大幅降低热风或红外干燥时间，在高温环境下的时间显著缩短，干燥过程生化阶段的品质损失较小，从而粗蛋白含量较高[23]；而挤压脱水预处理下，一方面挤压出的苜蓿汁液造成营养物质的损失，另一方面叶片和茎秆结构破坏较大，置于高温环境下所造成的粗蛋白含量损失更大。

表 4　不同干燥工艺条件下苜蓿色度

Tab. 4　Alfalfa color values under different drying process conditions

干燥方式	L	c	d
热风-未处理	$(55.25\pm0.144)^{ab}$	$(-11.16\pm0.200)^{d}$	$(28.77\pm0.728)^{bc}$
热风-压裂	$(54.55\pm0.486)^{bc}$	$(-11.09\pm0.087)^{d}$	$(28.68\pm0.408)^{bc}$
热风-晾晒	$(56.52\pm0.621)^{a}$	$(-9.66\pm0.059)^{a}$	$(26.83\pm0.563)^{d}$
热风-挤压脱水	$(52.85\pm0.427)^{d}$	$(-10.73\pm0.135)^{c}$	$(27.32\pm0.258)^{d}$
红外-未处理	$(53.46\pm0.548)^{cd}$	$(-11.57\pm0.079)^{e}$	$(29.45\pm0.396)^{ab}$
红外-压裂	$(54.17\pm1.026)^{bcd}$	$(-11.19\pm0.174)^{d}$	$(30.07\pm0.562)^{a}$
红外-晾晒	$(56.34\pm0.966)^{a}$	$(-10.40\pm0.076)^{b}$	$(27.98\pm0.600)^{cd}$
红外-挤压脱水	$(53.62\pm0.688)^{cd}$	$(-10.54\pm0.133)^{bc}$	$(28.59\pm0.869)^{bc}$

注：同列数据不同字母表示差异显著（$P<0.05$），下同。

与热风干燥相比，红外干燥方式下未处理、压裂和挤压脱水预处理组的苜蓿蛋白质量分数提高 0.98～1.08 个百分点，晾晒预处理组无显著变化，这是由于红外干燥利用红外辐射对物体进行加热，使物料内部水分蒸发，水分迁移和热量传递方向一致，干燥时长更短，对品质损失较小[24-25]。

表 5 粗蛋白含量、纤维含量和相对饲喂价值

Tab. 5 Crude protein content, fiber content and feeding value

干燥方式	CP 质量分数/%	ADF 质量分数/%	NDF 质量分数/%	RFV
热风-未处理	(22.82 ±0.067)^{c}	(27.44 ±0.331)^{b}	(43.44 ±0.514)^{c}	(144.60 ±1.232)^{c}
热风-压裂	(23.63 ±0.343)^{b}	(25.66 ±0.123)^{d}	(40.69 ±0.342)^{e}	(149.14 ±1.225)^{b}
热风-晾晒	(24.53 ±0.267)^{a}	(27.95 ±0.547)^{b}	(42.94 ±0.457)^{c}	(157.55 ±1.506)^{a}
热风-挤压脱水	(21.88 ±0.014)^{d}	(27.60 ±0.326)^{b}	(45.94 ±0.703)^{a}	(136.51 ±2.141)^{d}
红外-未处理	(23.80 ±0.154)^{b}	(29.88 ±0.296)^{a}	(42.73 ±0.488)^{c}	(142.87 ±1.312)^{c}
红外-压裂	(24.71 ±0.301)^{a}	(26.99 ±0.633)^{bc}	(42.34 ±0.269)^{cd}	(145.45 ±2.230)^{c}
红外-晾晒	(24.59 ±0.213)^{a}	(26.11 ±0.429)^{cd}	(41.36 ±0.56)^{de}	(154.25 ±2.478)^{a}
红外-挤压脱水	(22.96 ±0.029)^{c}	(29.30 ±0.458)^{a}	(44.53 ±0.425)^{b}	(138.05 ±0.642)^{d}

2.5 纤维含量与相对饲喂价值

从表 5 中可以看出,不同干燥方式下晾晒预处理组的相对饲喂价值最高,RFV 值均大于 150,较未处理组提高了 11.37 ~ 12.95;挤压脱水预处理组苜蓿相对饲喂价值最低;干燥方式对苜蓿相对饲喂价值影响小于预处理方式。结果表明挤压脱水预处理会提高 ADF 和 NDF 含量,降低苜蓿饲喂价值,这可能是由于苜蓿挤压脱水过程中脱除了水溶性物质,并造成部分干物质流失;而压裂和晾晒预处理对苜蓿茎叶结构的破坏较小,且显著降低干燥时长,因此 ADF 和 NDF 含量较低,相对饲喂价值更高。

3 结束语

苜蓿红外干燥速率高于热风干燥,干燥时长缩短 21.6% ~ 45.3%。预处理工艺均有利于提高苜蓿干燥速率,与未处理组相比,晾晒预处理组干燥时长缩短 70.0% 以上,其次是挤压脱水预处理。苜蓿干燥特性曲线符合幂指数函数,Page 模型的拟合度最高。挤压脱水预处理组的蛋白含量和相对饲喂价值最低,品质损失较大;在不同干燥方式下晾晒预处理组亮度和红绿值较高,色泽损失较大,粗蛋白含量和相对饲喂价值最高。综合评定苜蓿干燥最佳工艺为晾晒预处理与 60℃红外干燥处理组。

参 考 文 献

[1] DE VEGA A, GASA J, CASTRILLO C. Presentation (chopped versus ground and pelleted) of a low-quality alfalfa hay in sheep: effects on intake, feeding behaviour, rumen fill and digestion, and passage[J]. Animals, 2025, 15(4): 541.

[2] CHE G, WEN H, WAN L, et al. Kinematic simulation and experimental study on rotating air flow for drying alfalfa[J]. Drying Technology, 2015, 33(14): 1720 - 1727.

[3] NGENZI O D, RUVUGA P, MSALYA G, et al. Participatory establishment of *Cenchrus ciliaris* forage grass among pastoralists in a semi-arid rangeland area of eastern Tanzania[J]. African Journal of Range & Forage Science, 2024, 41(1): 29 - 38.

[4] 刘丽英, 王玉芝, 刘志刚, 等. 雨淋对苜蓿干燥过程中营养品质及真菌菌群结构的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(7): 2132 - 2139.
LIU Liying, WANG Yuzhi, LIU Zhigang, et al. Effects of rainfall on nutritional quality and fungal community structure in alfalfa during drying process[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2132 - 2139. (in Chinese)

[5] 刘丽英, 常春, 刘红梅, 等. 环境因子对苜蓿干燥过程中营养物质的影响[J]. 中国草地学报, 2022,44(12): 55 - 63.
LIU Liying, CHANG Chun, LIU Hongmei, et al. Effect of environmental factors on nutrients in alfalfa drying process[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(12): 55 - 63. (in Chinese)

[6] 杨世昆, 杜建强, 刘贵林, 等. 牧草湿法收获工艺与装备系统评价[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 86 - 90, 95.
YANG Shikun, DU Jianqiang, LIU Guilin, et al. System evaluation on harvesting process and key equipments for green grass [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp. 2):86 - 90,95. (in Chinese)

[7] KAPLAN M, CETIN N, CIFTCI B,et al. Comparison of drying methods for biochemical composition, energy aspects, and color properties of alfalfa hay[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025, 15(7): 10331 - 10346.

[8] 梁庆伟, 杨秀芳, 娜日苏, 等. 压裂和翻晒技术对紫花苜蓿含水量及干草品质的影响[J]. 饲料工业, 2017, 38(5): 17 - 20.
LIANG Qingwei, YANG Xiufang, NA Risu, et al. Effect of crushed and tedded treatment on moisture and quality of alfalfa hay [J]. Feed Industry, 2017, 38(5): 17 - 20. (in Chinese)

[9] 刘铸. 基于红外热风干燥对紫花苜蓿干燥特性及营养的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2022.
LIU Zhu. Study on drying characteristics and nutrition of alfalfa based on infrared hot air drying [D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[10] MOHAN V P C, TALUKDAR P. Experimental studies for convective drying of potato[J]. Heat Transfer Engineering, 2014, 35(14 - 15): 1288 - 1297.

[11] BALAR M, LI M, TOKER O S, et al. Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 182 – 190.
[12] MADAMBA A P S, DRISCOLL B R H, BUCKLE B K A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75 – 97.
[13] SHARMA P G, VERMA C R, PATHARE B P. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005,67(3): 361 – 366.
[14] CUNNIFF P A. Official methods of analysis of AOAC international[J]. AOAC International Journal, 1997, 80(6): 127A.
[15] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Lewis methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3583 – 3597.
[16] 郑先哲, 王忠江, 金长江. 牧草干燥理论与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
[17] TEDESCHI L O, GREENWOOD P L, ILAN H. Advancements in sensor technology and decision support intelligent tools to assist smart livestock farming[J]. Journal of Animal Science, 2021, 99(2): 1 – 11.
[18] 皇圆圆. 热风和红外干燥对咖啡叶理化指标和品质的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
HUANG Yuanyuan. The effects of hot-air and infrared drying on the physiochemical properties and quality of coffee leaves [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2023. (in Chinese)
[19] 陈坤杰, 王硕, 颜建春, 等. 石墨烯低温远红外辐射干燥稻谷干燥特性与品质研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 346 – 351, 384.
CHEN Kunjie, WANG Shuo, YAN Jianchun, et al. Drying characteristics and quality of paddy under low temperatures and far-infrared drying conditions of graphene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 346 – 351, 384. (in Chinese)
[20] ADEKANYE T, ALHASSAN E, AMODU M, et al. Kinetics of heat and mass transfer in moringa leaves drying in a cabinet dryer[J]. Results in Engineering, 2025, 26: 104763.
[21] 钱旺, 杨世昆, 刘贵林, 等. 太阳能牧草干燥成套设备干燥工艺参数优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 110 – 118.
QIAN Wang, YANG Shikun, LIU Guilin, et al. Optimization of drying process parameters of solar herbage dry equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):110 – 118. (in Chinese)
[22] 刘丽英, 贾玉山, 王志军, 等. 苜蓿干燥过程中叶绿素与营养物质含量的变化及相关性[J]. 中国草地学报, 2021, 43(11): 60 – 68.
LIU Liying, JIA Yushan, WANG Zhijun, et al. The law and correlation of chlorophyll and nutrient content changes during alfalfa drying[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(11): 60 – 68. (in Chinese)
[23] LEWICKI, PIOTR P. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: a review[J]. International Journal of Food Properties, 1998, 1(1): 1 – 22.
[24] YAGOUB E G A, MA H, FAKAYODE O A. Combinative effect of cutting orientation and drying techniques (hot air, vacuum, freeze and catalytic infrared drying) on the physicochemical properties of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)[J]. LWT—Food Science & Technology, 2021, 144(1): 1112 – 1138.
[25] 尚建伟, 张倩, 王同勋, 等. 远红外干燥对甘草切片干燥特性及品质的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(8): 1609 – 1617.
SHANG Jianwei, ZHANG Qian, WANG Tongxun, et al. Effect of far-infrared drying on drying characteristics and quality of glycyrrhiza slices[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(8): 1609 – 1617. (in Chinese)