

DOI:10.11686/cyxb2025103

http://cyxb.magtech.com.cn

杜建民, 王占军, 汪威, 等. 灌区苜蓿田间晾晒干燥速率与营养物质变化对主要环境因素的响应. 草业学报, 2026, 35(2): 131-142.

DU Jian-min, WANG Zhan-jun, WANG Wei, et al. Response of drying rate and nutrient content changes to the main environmental factors during alfalfa natural drying in irrigation areas. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(2): 131-142.

## 灌区苜蓿田间晾晒干燥速率与营养物质变化对主要环境因素的响应

杜建民<sup>1</sup>, 王占军<sup>1</sup>, 汪威<sup>2</sup>, 马雪鹏<sup>1</sup>, 李东宁<sup>3</sup>, 李吉祥<sup>2</sup>

(1. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 宁夏 银川 750002; 2. 灵武市同心农业综合开发有限公司, 宁夏 灵武 751400; 3. 宁夏农垦茂盛草业有限公司, 宁夏 银川 750002)

**摘要:**为解析田间晾晒苜蓿干燥速率变化和营养物质耗损过程,揭示影响苜蓿干草调制的主要环境因素。通过对引黄灌区不同收获茬次机械刈割压扁晾晒苜蓿的植株含水量及主要营养物质[粗蛋白(CP)、粗灰分(Ash)、粗脂肪(EE)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、可溶性碳水化合物(WSC)、相对饲喂价值(RFV)]含量的定时采集,结合晾晒过程中田间气象要素与土壤水分含量的监测,分析苜蓿晾晒水分散失、营养物质变化过程,通过相关性分析,明确影响干燥速率、营养物质变化的主要环境因素。结果表明:1)苜蓿晾晒过程中,生理干燥阶段占晾晒历时的比例为19.80%~52.25%,随5-9月收获季节的延续生理干燥阶段历时占比逐步减小;全株的干燥速率介于茎和叶片之间,在生理干燥阶段干燥速率为:叶片>全株>茎,而在生化干燥阶段为:茎>全株>叶片,且生理干燥阶段茎、叶片及全株干燥速率分别是生化干燥阶段的1.79、7.69和3.43倍。2)营养物质CP、WSC、EE含量和RFV在晾晒始末、生理及生化干燥阶段均有下降,而Ash、NDF和ADF含量则为上升,且EE、RFV、WSC的损失以及Ash、NDF和ADF的增加主要发生在生理干燥阶段,其损失率和增幅占比分别为52.09%~75.00%和48.53%~62.94%,而CP的损失主要发生在生化干燥阶段,其损失率占比达71.18%~75.82%。3)环境因素对干燥速率的影响为:气温>太阳辐射强度>风速>空气相对湿度>0~10 cm土壤含水量,且气温、太阳辐射强度、风速是影响干燥速率的主效因子,均与干燥速率呈显著或极显著正相关关系;影响营养物质含量的主要环境因素为:气温、风速、空气相对湿度和0~10 cm土壤含水量。

**关键词:**苜蓿;田间晾晒;环境因素;干燥速率;营养品质

## Response of drying rate and nutrient content changes to the main environmental factors during alfalfa natural drying in irrigation areas

DU Jian-min<sup>1</sup>, WANG Zhan-jun<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, MA Xue-peng<sup>1</sup>, LI Dong-ning<sup>3</sup>, LI Ji-xiang<sup>2</sup>

1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Tongxin Agricultural Comprehensive Development Co., Ltd, Lingwu City, Lingwu 751400, China; 3. Ningxia Nongken Maosheng Prataculture Co., Ltd, Yinchuan 750002, China

**Abstract:** This study comprehensively analyzed the dynamics of drying rate and nutrient content during natural drying of alfalfa (*Medicago sativa*) in irrigated regions to better understand the key environmental factors influencing alfalfa hay drying. Meteorological and soil moisture data were collected and plant traits including water content, and major

收稿日期:2025-03-25;改回日期:2025-06-03

基金项目:自治区农业科技自主创新专项(NKYJ-22-01),宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题(NGSB-2021-15-02),国家牧草产业技术体系盐池综合试验站(CARS-34)和银川市牧草高效生产科技创新团队项目资助。

作者简介:杜建民(1977-),男,宁夏青铜峡人,副研究员,硕士。E-mail: nxdjm2007@126.com

nutrient components (crude protein, CP; crude ash, Ash; ether extract, EE; neutral detergent fiber, NDF; acid detergent fiber, ADF; water-soluble carbohydrate, WSC; and relative feeding value, RFV) were measured in alfalfa with flattened stems harvested using mechanical equipment, at different cutting dates. The processes of water loss and nutrient changes were analyzed, and key environmental factors affecting drying rate and nutrient dynamics were identified through correlation analysis. Furthermore, the study divided the natural drying process of alfalfa into physiological (from cutting of alfalfa to when the whole-plant moisture content decreased to approximately 40%) and biochemical (the whole-plant moisture content decreased from 40% to 18%) drying stages, and analyzed and compared these two stages respectively. The results showed that: 1) The physiological drying stage accounted for 19.80%–52.25% of the total natural drying process, with the proportion decreasing gradually as cutting dates from May to September were delayed. During the physiological drying stage, drying rates followed the order: leaves>whole plant>stems; in contrast, the biochemical drying stage exhibited the order: stems>whole plant>leaves. Drying rates of stems, leaves, and whole plants in the physiological drying stage were 1.79-, 7.69-, and 3.43-fold higher, respectively, than those in the biochemical drying stage. 2) Contents of CP, WSC, EE, and RFV decreased throughout the drying process (including the beginning and end of drying, for both physiological and biochemical drying stages), whereas Ash, NDF, and ADF contents increased. Losses of EE, RFV, WSC or gains of Ash, NDF, ADF occurred during the physiological stage, with loss rates ranging from 52.09%–75.00% and gain rates from 48.53%–62.94%. CP loss primarily occurred during the biochemical drying stage, accounting for 71.18%–75.82% of total loss. 3) During alfalfa drying, environmental factors influenced drying rate in the order: air temperature>solar radiation intensity>wind speed>air relative humidity>0–10 cm soil moisture. The key factors (air temperature, solar radiation intensity, and wind speed) showed significant ( $P<0.05$ ) or highly significant ( $P<0.01$ ) positive correlations with drying rate. Nutrient content in alfalfa hay was primarily affected by air temperature, wind speed, air relative humidity, and 0–10 cm soil moisture.

**Key words:** alfalfa; natural drying; environmental factors; drying rate; nutritional quality

苜蓿 (*Medicago sativa*) 为多年生优质豆科牧草, 是畜牧业生产重要的高蛋白粗饲料, 素有“牧草之王”的美誉, 被称为牛奶生产的第一车间<sup>[1]</sup>。伴随我国农业结构调整和“振兴奶业苜蓿发展行动”的实施, 苜蓿种植得到迅速发展, 截至2022年底留床面积达181万 $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>, 其中, 地处农牧交错带的甘肃、内蒙古、宁夏灌区成为苜蓿集群生产基地, 产量占全国60%以上<sup>[3]</sup>。然而, 由于国内苜蓿产业起步较晚, 国产苜蓿商品草质量以中低端为主, 用于奶牛饲喂的优质苜蓿草捆主要依赖进口<sup>[4–5]</sup>, 仅2022年进口量就达194万t, 占全国苜蓿消费量的28.12%<sup>[3]</sup>。如何提升国产苜蓿干草品质成为产业发展面临的突出问题。

已有研究表明, 影响苜蓿干草品质的主要因素为原料草自身营养物质含量和晾晒过程中营养物质的保存状况<sup>[6]</sup>。原料草自身营养物质的提高可通过品种选择<sup>[7]</sup>、水肥协同供给<sup>[8]</sup>、病虫害防控<sup>[9]</sup>、适期刈割<sup>[10]</sup>等栽培措施的调控得以实现。而晾晒过程中营养物质的保存主要与环境因素有关, 包括以温度、辐射强度、风速、空气湿度、土壤温湿度为主的田间自然条件<sup>[11–12]</sup>和以晾晒厚度<sup>[13]</sup>、压扁程度<sup>[14]</sup>、喷施干燥剂<sup>[15]</sup>、搂草打捆时期<sup>[16]</sup>为主的人为干扰条件, 均是通过影响干燥速率而对于干草品质产生影响<sup>[17]</sup>。在苜蓿田间晾晒中不可控的自然条件和人为干扰相互交织给研究工作带来很大困难, 虽有部分学者已开展了大量工作, 但在系统揭示苜蓿田间晾晒中水分含量、干燥速率及营养物质的变化过程方面尚未形成相对一致的结论, 在环境因素与干燥速率、营养物质耗损的相关性方面探索不足, 已成为当前苜蓿干草调制中的热点问题<sup>[18]</sup>。

为此, 本研究以宁夏引黄灌区机械刈割压扁田间晾晒苜蓿为对象, 通过对不同茬次晾晒苜蓿的水分及营养物质含量的定时采集, 结合晾晒过程中田间气象要素与土壤水分含量的监测, 分析苜蓿晾晒水分散失、营养物质变

化过程,探讨田间晾晒过程中影响苜蓿干燥速率、营养物质变化的主要环境因素,以期为揭示苜蓿干草调制过程中环境因素对于干草品质耗损的影响提供支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验在宁夏回族自治区灵武市梧桐树乡李家圈村开展,地处银川平原中部,属温带大陆性气候,海拔 1250 m,年均气温 9.6 °C,无霜期 157 d,多年平均始霜期 9 月 28 日,晚霜期 5 月 4 日,年均日照时数 3002.1 h,年均降水量 179.2~322.4 mm<sup>[19]</sup>,试验地土壤类型为灌淤土,漫灌灌溉。

### 1.2 试验设计

试验在 2024 年开展,供试苜蓿为 2 年生 MF4020,为便于机械作业,选择长 400 m、宽 40 m 的条田开展试验,在苜蓿初花期用牵引式刈割压扁机(DISCO-3150TRC,德国)于 5 月 25 日、6 月 30 日、7 月 31 日 8:00 和 9 月 14 日 9:30 进行刈割,留茬高度 5~6 cm,然后立即用牵引式散草机(VOLTO-700,德国)进行散草,至苜蓿水分含量为 40%~45% 时用指盘式搂草机(CADDY-8,意大利)归集成垄,在苜蓿水分含量≤18% 时结束晾晒进行打捆。于各茬苜蓿晾晒期间,在条田 200 m 处平行设置 6 个取样点,自刈割至打捆期间,于每日 8:00—18:00 进行取样,第 4 茬苜蓿在刈割当天 9:30—19:30 进行取样,间隔时长 2.5 h。取样时为防止苜蓿叶片脱落影响测试结果,先将 40 cm×40 cm 托盘置于晾晒苜蓿下方,再将另一相同的托盘倒扣在其上方,将两个托盘压紧后用剪刀紧贴托盘四周将夹住的苜蓿草剪断,两个托盘中间留存部分即为获取样品,可重复取样至每个样点每次获取 500 和 200 g 样品各 1 份,分别用于水分含量和营养物质含量的测定。各茬次苜蓿田间晾晒期间天气状况及主要环境因子参数均值见表 1。

表 1 各茬次苜蓿晾晒持续时间及主要环境参数

Table 1 Duration and main environmental parameters of alfalfa drying in each stubble

茬次 Stubble	刈割日期 Cutting date (month-day)	鲜草产量 Fresh grass yield (t·hm <sup>-2</sup> )	晾晒厚度 Drying thickness (cm)	晾晒 历时 Drying time (h)	天气状况 Weather conditions	太阳辐射 强度 Solar radiation intensity (W·m <sup>-2</sup> )	气温 Air temperature (°C)	空气相对 湿度 Air relative humidity (%)	风速 Wind speed (m·s <sup>-1</sup> )	刈割时 0~10 cm 土壤含水量 Soil water content at 0-10 cm when cutting (%)
第 1 茬 The first stubble	5-25	23.40	10	55.5	晴 Sunny, 有风 Wind	417.90	24.73	14.17	3.73	11.76
第 2 茬 The second stubble	6-30	21.55	7	74.5	晴 Sunny, 阵风 Gust, 7 月 1 日下午阵雨 July 1st afternoon shower	482.55	29.08	40.25	1.02	14.49
第 3 茬 The third stubble	7-31	10.83	4	31.5	晴 Sunny, 有风 Wind	481.83	34.01	37.53	0.88	14.23
第 4 茬 The fourth stubble	9-14	12.34	5	50.5	晴转多云 Sunny change to cloudy, 有风 Wind	246.30	22.54	45.17	0.89	10.74

### 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 田间环境参数测定** 各茬苜蓿刈割前 1 d,在试验条田田埂布设 Adcon-Ws 自动气象站(德国),对距地面 2 m 处气温、空气相对湿度、风速及太阳辐射强度进行监测,8:00—18:00 数据收集步长为 2.5 h,18:00—8:00 数据收集步长为 2 h。田间 0~10 cm 土壤含水量采用土钻取土,烘箱烘干减重法<sup>[20]</sup>进行测定,6 次重复,取样时间与晾晒苜蓿取样时间相同。

**1.3.2 苜蓿水分含量及干燥速率测定** 将各时间点获取的 500 g 苜蓿样品进行茎、叶分离,用天平(LQC-10002,中国)分别称量其初始重量,后置于 65 °C 烘箱内烘至恒重并称量其干重,参照尹强等<sup>[21]</sup>的方法,计算不同

时间点苜蓿茎、叶及全株水分含量( $G_n$ )和相应时间段的干燥速率( $V_n$ ),计算公式如下:

$$G_n = (M_{n1} - M_{n2}) / M_{n2} \times 100\% \quad (1)$$

$$V_n = (G_n - G_{n+1}) / T_n \quad (2)$$

式中: $G_n$ 为苜蓿茎、叶或全株第 $n$ 次样品的水分含量,单位为%; $M_{n1}$ 和 $M_{n2}$ 分别为苜蓿茎、叶或全株第 $n$ 次样品的初始重量和烘干重量,单位为g; $V_n$ 为苜蓿茎、叶或全株样品在 $n$ 至 $n+1$ 次取样时段内的干燥速率,单位为 $\% \cdot h^{-1}$ ,正常值为正值,返潮时为负值; $n$ 为取样次数, $T_n$ 为取样的时间间隔,单位为h。

**1.3.3 苜蓿营养物质指标测定** 为防止采集的样品在保存过程中因生理生化作用而使营养物质含量发生变化<sup>[22]</sup>,将各时间点获取的200 g苜蓿样品装入塑料瓶置于液氮罐中超低温冷冻以阻断其生理生化过程<sup>[23]</sup>,带回实验室后转入 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存,待第4茬样品取样结束后,将各样品用QM-3SP2行星式球磨机(中国南京)研磨并烘干后进行营养物质指标测定。参照《饲料分析及饲料质量检测技术》<sup>[24]</sup>,采用凯氏定氮法测定粗蛋白(crude protein, CP)含量,灼烧法测定粗灰分(crude ash, Ash)含量,索氏浸提法测定粗脂肪(ether extract, EE)含量,范氏法测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量,蒽酮—硫酸法测定可溶性碳水化合物(water soluble carbohydrate, WSC)含量。参照王斌等<sup>[25]</sup>的方法计算相对饲喂价值(relative feeding value, RFV):

$$RFV = (88.9 - 0.779 \times ADF) \times (120 / NDF) / 1.29 \quad (3)$$

#### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2016软件进行数据处理和图表绘制,采用SPSS 20.0进行相关性分析。晾晒苜蓿生理干燥阶段为刈割后至全株含水量下降到40%左右的时间段,生化干燥阶段为晾晒苜蓿植株含水量由40%左右下降到18%的时间段。

参照刘丽英等<sup>[18]</sup>的方法,对晾晒苜蓿在晾晒始末、生理及生化干燥阶段营养物质损失率和增幅进行计算,其中,CP、WSC、EE和RFV损失率参照公式4计算,Ash、NDF和ADF增幅按公式5计算:

$$\text{损失率}(\%) = (\text{晾晒某时段初始含量} - \text{晾晒某时段结束含量}) / \text{晾晒初始含量} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{增幅}(\%) = (\text{晾晒某时段结束含量} - \text{晾晒某时段初始含量}) / \text{晾晒初始含量} \times 100\% \quad (5)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 晾晒苜蓿茎、叶片及全株含水量的变化

各茬次苜蓿0 h的全株含水量为:第2茬>第1茬>第3茬>第4茬,以第2茬的76.54%为最高值,以第4茬的69.97%为最低值,第1、3茬分别为73.21%和72.99%。由图1可知,各茬次苜蓿田间晾晒至安全收贮含水量的历时不同,以第2茬的74.5 h历时最长,以第3茬的31.5 h历时最短,第1、4茬则分别为55.5和50.5 h,且各茬次苜蓿的生理干燥阶段历时亦不相同,第1茬为29 h,第2茬为26.5 h,第3茬为7.5 h,第4茬为10 h,其分别占晾晒历时的52.25%、35.57%、23.81%和19.80%,随收获季节的延续生理干燥阶段历时占比逐步减小,而生化干燥阶段的历时占比则逐步增加。

从茎和叶片含水量变化来看,第1、2茬苜蓿在0 h时茎的含水量分别为74.16%、77.53%,均高于其叶片的含水量(71.53%、75.35%),且在第1、2茬苜蓿晾晒过程中,在相同晾晒历时其茎的含水量均高于叶片的含水量;而第3、4茬苜蓿在0 h时茎的含水量分别为71.28%、65.06%,低于其叶片的含水量(75.10%、74.03%),但自5 h至晾晒结束,其茎的含水量均高于相同时间点叶片的含水量。晾晒苜蓿第1茬叶片含水量在48 h时及第2、3、4茬茎、叶片及全株含水量在24、48和72 h比前一时间点均有不同程度增加,第2茬苜蓿在48 h时茎、叶片及全株含水量受降水影响增幅分别达68.98%、387.64%和99.94%,而其他时段茎、叶片及全株的含水量增幅分别为2.59%~62.46%、10.76%~102.28%和3.90%~84.40%,叶片的含水量增幅大于茎,表明晾晒苜蓿在夜间发生返潮时叶片的返潮强于茎。

### 2.2 晾晒苜蓿茎、叶片及全株干燥速率的变化

由图2和表2可知,在各茬次苜蓿田间晾晒过程中,全株的干燥速率介于茎和叶片之间,且茎、叶片及全株平

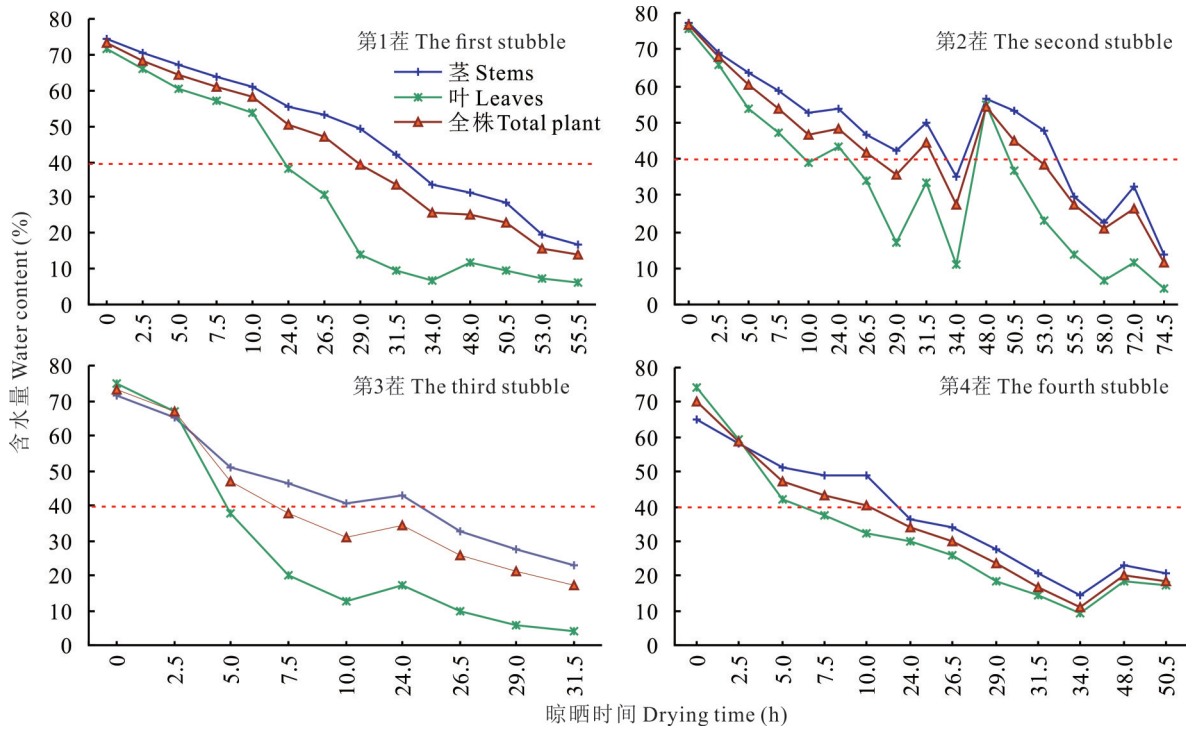


图 1 各茬次晾晒苜蓿茎、叶片及全株含水量的变化

Fig. 1 Change in water content of alfalfa stems, leaves and total plant during drying time for each stubble

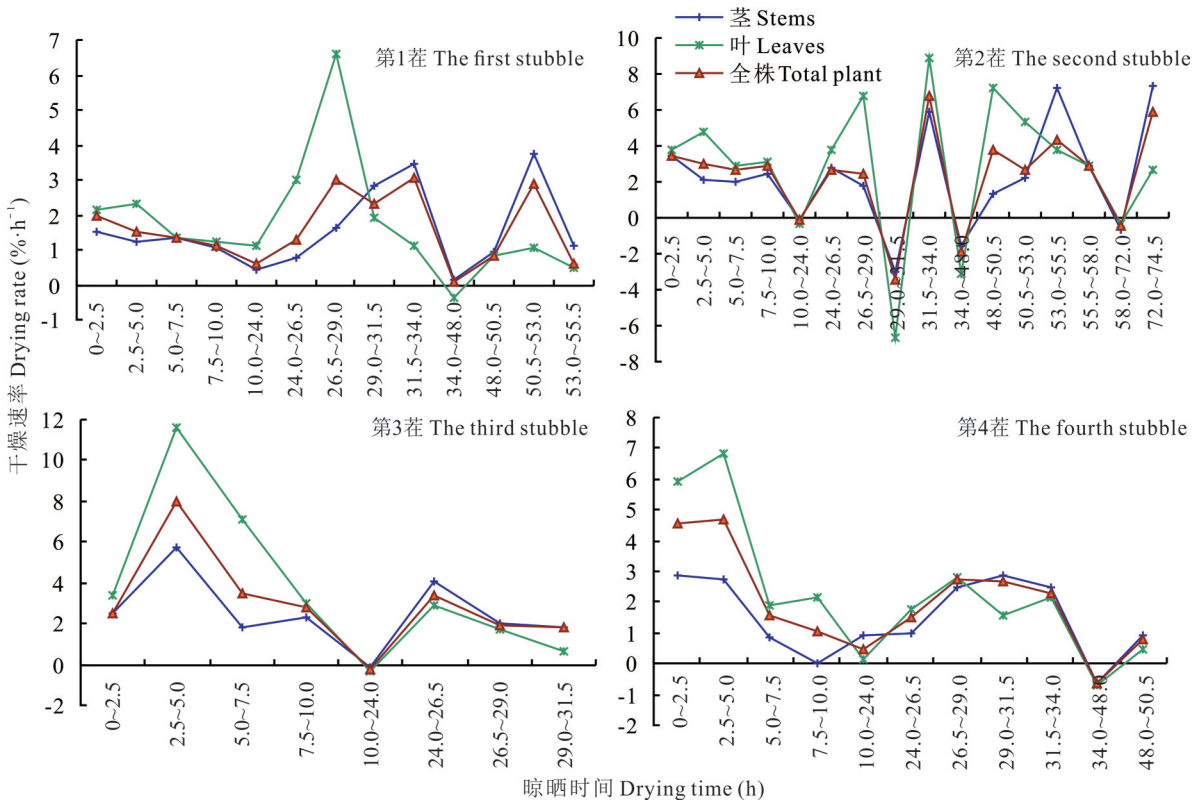


图 2 各茬次苜蓿茎、叶片及全株干燥速率随晾晒时段的变化

Fig. 2 Change in drying rate of alfalfa stems, leaves and total plant during drying time for each stubble

均干燥速率均表现为:第3茬>第1茬>第4茬>第2茬,分别以第3茬的1.53、2.26和1.78%·h<sup>-1</sup>为最高值,其次为第1茬的1.04、1.18和1.07%·h<sup>-1</sup>,第4茬茎、叶片及全株干燥速率分别为0.87、1.12和1.02%·h<sup>-1</sup>,受晾晒期

间降水影响,第2茬茎、叶片及全株的干燥速率(0.85、0.95和0.87%·h<sup>-1</sup>)为最低值。从晾晒不同时段来看,在生理干燥阶段各茬苜蓿茎、叶片及全株的干燥速率随晾晒时间的延续均表现为:叶片>全株>茎,叶片、全株及茎的干燥速率均值分别为3.77、2.54和1.75%·h<sup>-1</sup>,且差异达显著水平;而在生化干燥阶段,各茬苜蓿茎、叶片及全株的干燥速率随晾晒时间的延续表现为:茎>全株>叶片,茎、全株及叶片的干燥速率均值分别为0.89、0.74和0.49%·h<sup>-1</sup>,且差异亦达显著水平。第1茬苜蓿全株干燥速率均大于0,在晾晒过程中未出现返潮,而第2、3、4茬苜蓿全株干燥速率均出现小于0的情况,在晾晒过程中出现返潮,且在返潮期间叶片的平均干燥速率为-1.76%·h<sup>-1</sup>,低于茎的平均干燥速率(-0.97%·h<sup>-1</sup>)。

表2 苜蓿植株各晾晒时段干燥速率比较

Table 2 Comparison of drying rates of alfalfa plants during different drying stages (%·h<sup>-1</sup>)

晾晒时段 Drying stage	植株部位 Plant parts	干燥速率 Drying rate				
		第1茬 The first stubble	第2茬 The second stubble	第3茬 The third stubble	第4茬 The fourth stubble	均值 Average value
晾晒始末 Drying process	茎 Stems	1.04±0.08b	0.85±0.04b	1.53±0.11c	0.87±0.06b	1.07±0.02c
	叶片 Leaves	1.18±0.06a	0.95±0.07a	2.26±0.14a	1.12±0.09a	1.38±0.04a
	全株 Total plant	1.07±0.10ab	0.87±0.08ab	1.78±0.12b	1.02±0.08ab	1.19±0.05b
生理干燥 Physiological drying stage	茎 Stems	0.86±0.07c	1.16±0.10c	3.35±0.18c	1.61±0.11c	1.75±0.07c
	叶片 Leaves	1.98±0.11a	1.57±0.06a	7.35±0.24a	4.20±0.26a	3.77±0.16a
	全株 Total plant	1.17±0.08b	1.32±0.08b	4.69±0.31b	2.95±0.17b	2.54±0.12b
生化干燥 Biochemical drying stage	茎 Stems	1.23±0.06a	0.69±0.03a	0.97±0.07a	0.69±0.04a	0.89±0.05a
	叶片 Leaves	0.31±0.02c	0.61±0.05b	0.66±0.04c	0.36±0.02c	0.49±0.03c
	全株 Total plant	0.95±0.04b	0.63±0.03ab	0.87±0.06b	0.55±0.04b	0.74±0.04b

注:不同小写字母表示晾晒时段各茬次苜蓿茎、叶片及全株干燥速率间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant of drying rate at alfalfa stems, leaves and total plant during drying time for each stubble ( $P<0.05$ ).

### 2.3 田间晾晒过程中苜蓿主要营养物质含量的变化

由表3可知,苜蓿在田间晾晒过程中营养物质含量呈波浪式变化。从整个晾晒过程来看,各茬苜蓿晾晒始末CP、WSC、EE含量和RFV均呈下降趋势,且第1、2茬损失率均为:RFV>WSC>CP>EE,第3、4茬损失率则为:RFV>CP>WSC>EE,以RFV的损失率(14.64%~33.66%)为最大,以EE(7.91%~9.86%)的损失率为最小,CP损失率为11.55%~14.26%,WSC的损失率为9.54%~16.35%;而Ash、NDF和ADF含量在晾晒期始末表现为增加,且第1、4茬增幅为:ADF>Ash>NDF,第2、3茬增幅为:ADF>NDF>Ash,以ADF的增幅(19.28%~32.22%)为最大,NDF增幅为9.23%~32.05%,Ash增幅为9.93%~11.91%。

在晾晒0~5h的生理活性阶段,各茬苜蓿Ash、WSC、NDF、ADF含量均升高,且以ADF的平均增幅8.76%为最高值,以NDF的平均增幅4.97%为最低值,Ash和WSC的平均增幅分别为8.13%和5.45%,而RFV下降了7.66%,CP含量在第1、2和4茬均表现为下降,EE含量仅在第2茬为下降。在生理干燥阶段,各茬苜蓿CP、WSC、EE含量和RFV均下降,且第1、2茬降幅为:RFV>WSC>EE>CP,第3、4茬则为:RFV>EE>WSC>CP,以RFV的损失率(8.64%~20.46%)为最大,以CP损失率(3.19%~3.97%)为最小,WSC损失率为5.65%~8.52%,EE的损失率为5.76%~7.26%,但此阶段各营养物质损失率占晾晒始末损失率的比例为:EE>RFV>WSC>CP,以EE的71.43%~75.00%为最高,其次为RFV的57.20%~62.03%,以CP的24.18%~28.82%为最低,WSC占比为52.09%~65.22%;而Ash、NDF和ADF含量在生理干燥阶段均表现为增加,且第1、4茬增幅为:ADF>Ash>NDF,第2、3茬则为:ADF>NDF>Ash,以ADF的增幅(11.48%~18.37%)为最大,NDF增幅为4.61%~16.85%,Ash增幅为5.48%~6.64%,其占晾晒始末增幅的比例分别为57.00%~62.94%、48.53%~58.79%和51.46%~57.00%。在生化干燥阶段,各茬苜蓿CP、WSC、EE含量和

表 3 各茬次苜蓿晾晒期间主要营养成分含量及损失率

Table 3 Main nutrient content and loss rate of alfalfa drying time in each stubble

茬次 Stubble	取样时间 Sampling time (h)	粗灰分 Crude ash (Ash, %DM)	粗蛋白 Crude protein (CP, %DM)	可溶性碳水化合物 Water soluble carbo- hydrate (WSC, %DM)	粗脂肪 Ether extract (EE, %DM)	中性洗涤纤维 Neutral deter- gent fiber (NDF, %DM)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %DM)	相对饲喂价值 Relative feeding value (RFV)
第 1 茬 The first stubble	0	8.90±0.42c	21.29±0.24a	14.21±0.19ab	1.24±0.05b	37.60±0.93e	27.78±1.83c	166.40±1.66a
	5.0	10.09±0.30ab	20.43±0.40b	14.80±0.63a	2.87±0.39a	38.39±0.48de	29.78±0.95bc	159.20±3.41ab
	10.0	9.61±0.51b	19.16±0.57cd	14.30±0.29ab	1.11±0.16e	36.51±1.35e	29.71±1.68bc	167.54±9.43a
	24.0	10.43±0.30a	18.70±0.21d	13.81±0.37bc	1.09±0.07e	39.66±1.52cd	29.33±1.38bc	154.93±8.29b
	29.0	9.47±0.28bc	20.61±0.20b	13.12±0.23c	1.15±0.13d	39.64±1.72cd	31.36±1.72ab	151.29±8.04b
	34.0	9.60±0.21bc	19.63±0.52c	14.14±0.45ab	1.09±0.04e	44.58±1.52a	31.37±1.09ab	134.51±5.10c
	48.0	9.79±0.37ab	17.22±0.42e	13.18±0.64c	1.20±0.16c	42.19±1.66b	33.09±1.00a	139.18±6.92c
	55.5	9.90±0.10ab	18.83±0.17d	12.36±0.10d	1.12±0.05de	41.07±1.10bc	33.62±1.88a	142.04±0.60c
	Loss (%)	11.24±0.48	11.55±0.27	13.02±0.60	9.68±0.36	9.23±0.69	21.02±1.25	14.64±0.59
第 2 茬 The second stubble	0	9.49±0.55ab	20.36±0.98ab	13.15±1.15ab	1.33±0.13ab	39.59±1.12e	31.69±0.70f	150.88±4.85a
	5.0	10.24±1.42ab	20.24±0.49ab	14.02±0.59a	1.16±0.12b	43.29±0.54cd	34.84±1.52e	132.71±1.75b
	10.0	9.64±0.53ab	21.33±1.07a	13.09±1.61ab	1.52±0.10a	42.45±1.13de	36.74±1.15de	132.09±4.41b
	24.0	9.36±0.22ab	20.57±1.46ab	12.79±1.13abc	1.51±0.09a	44.38±0.91cd	36.92±1.43cde	114.24±2.46d
	26.5	10.12±0.67ab	19.65±1.79abc	12.03±1.71abcd	1.24±0.09b	46.26±2.04cd	37.51±1.05cd	120.01±6.99cd
	34.0	9.19±0.46b	19.39±1.62bcd	10.41±0.84d	1.34±0.28ab	45.87±1.66c	32.56±1.01f	128.85±5.52bc
	48.0	9.38±0.50ab	18.35±0.67cd	10.87±1.24cd	1.29±0.18ab	42.89±2.08d	38.93±1.05bc	127.04±7.46bc
	58.0	9.56±0.51ab	18.03±0.28cd	11.58±1.27bcd	1.21±0.18b	46.96±2.59bc	37.27±1.33cd	118.59±4.48c
	72.0	10.37±1.02ab	17.97±0.68cd	11.21±0.62bcd	1.15±0.10b	49.46±2.02ab	40.35±1.68ab	108.08±6.48de
	74.5	10.62±1.06a	17.86±1.03d	11.00±0.88cd	1.21±0.12b	52.28±1.61a	41.90±0.68a	100.10±3.77e
Loss (%)	11.91±0.43	12.28±1.34	16.35±0.79	9.02±0.22	32.05±0.34	32.22±1.26	33.66±0.41	
第 3 茬 The third stubble	0	9.68±0.19bc	19.15±0.38b	13.10±0.42ab	1.39±0.16ab	39.43±1.14c	30.13±1.43c	154.36±4.90a
	5.0	9.85±0.52bc	20.50±0.54a	14.17±0.61a	1.50±0.29ab	41.71±1.01ab	31.40±1.29bc	143.72±5.52ab
	7.5	10.21±0.91ab	18.49±1.17b	12.36±0.76b	1.31±0.33ab	41.81±0.96ab	33.59±1.52abc	139.58±3.60bc
	10.0	9.31±0.28c	19.53±0.75ab	13.15±1.06ab	1.24±0.16b	43.63±1.20a	34.14±1.84ab	135.01±4.15c
	24.0	9.41±0.46bc	18.43±0.67b	13.26±1.00ab	1.63±0.10a	39.71±1.23bc	35.52±1.26a	143.44±5.39b
	31.5	10.71±0.62a	16.42±0.29c	11.85±0.30b	1.28±0.16ab	43.76±1.09a	35.94±1.53a	129.46±5.49c
	Loss (%)	10.64±1.01	14.26±0.36	9.54±0.64	7.91±0.58	10.98±0.86	19.28±1.26	16.13±0.96
第 4 茬 The fourth stubble	0	9.08±0.57b	20.91±0.54a	15.73±0.79ab	1.42±0.37a	39.25±0.97c	30.21±1.51c	154.92±6.49a
	5.0	9.64±0.58ab	20.90±1.21a	16.18±0.86a	1.51±0.26a	40.29±1.63bc	34.35±1.16ab	143.47±7.83bc
	10.0	9.58±0.35ab	20.08±1.27ab	14.68±0.44ab	1.32±0.12a	40.06±1.09bc	33.93±1.39b	141.53±2.71bc
	24.0	9.51±0.22ab	18.50±0.72bc	15.78±0.98a	1.10±0.08a	40.99±1.15abc	30.34±0.55c	148.11±3.22ab
	34.0	9.77±0.45ab	19.31±1.19abc	15.45±1.24ab	1.21±0.19a	41.77±0.81ab	32.86±1.13b	140.98±1.63bc
	48.0	9.85±0.29ab	18.18±0.85c	14.93±0.84ab	1.31±0.27a	42.02±2.09ab	34.31±0.82ab	137.64±6.11cd
	50.5	9.98±0.24a	18.03±0.64c	14.12±0.78b	1.28±0.33a	42.98±1.02a	36.12±1.63a	131.65±5.79d
	Loss (%)	9.93±0.83	13.77±0.97	10.24±0.47	9.86±0.30	9.50±0.43	19.56±1.05	15.11±0.52

注：不同小写字母表示各茬次苜蓿晾晒期间主要营养成分含量间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Loss: 损失率或增幅。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among alfalfa main nutrient content during drying time in each stubble ( $P < 0.05$ ). Loss: Loss or rise rate.

RFV均下降,各营养物质损失率占晾晒始末损失率的比例为:CP>WSC>RFV>EE,以CP(71.18%~75.82%)为最高,WSC为34.78%~47.91%,其次为RFV(37.97%~42.80%),以EE占比(25.00%~28.57%)为最低;而ADF、NDF和Ash含量均表现为增加,其占晾晒始末增幅的比例分别为37.06%~43.00%、41.21%~51.47%和43.00%~48.54%。

#### 2.4 环境因素与苜蓿干燥速率和主要营养物质含量的相关性

各茬次苜蓿田间晾晒不同时段干燥速率及品质指标与环境因素间的相关分析表明(表4),各环境因素与干燥速率的相关性为:气温>太阳辐射强度>风速>空气相对湿度>0~10 cm土壤含水量,其中,气温、太阳辐射强度、风速与干燥速率呈极显著或显著的正相关关系,而空气相对湿度和0~10 cm土壤含水量与干燥速率呈负相关关系,且不显著。品质指标与环境因素的相关性较为复杂,Ash含量与太阳辐射强度呈极显著正相关关系,与空气相对湿度呈显著负相关关系,而气温、风速和0~10 cm土壤含水量与Ash含量相关性不显著;CP含量与空气相对湿度呈极显著负相关关系,与气温和0~10 cm土壤含水量呈显著或极显著正相关关系;WSC含量与0~10 cm土壤含水量、气温和太阳辐射强度呈显著或极显著负相关关系;EE含量仅与气温呈显著正相关关系,与其他各环境因素间相关性不显著;NDF和ADF含量与0~10 cm土壤含水量、空气相对湿度、气温呈显著或极显著正相关关系,与风速呈极显著负相关关系,太阳辐射强度与NDF和ADF含量相关性不显著;RFV与各环境因素的相关性为:0~10 cm土壤含水量>风速>空气相对湿度>气温>太阳辐射强度,0~10 cm土壤含水量、空气相对湿度和气温与RFV呈显著或极显著负相关关系,风速与RFV呈极显著正相关关系。

表4 环境因素与苜蓿干燥速率和主要营养物质含量的相关性

Table 4 The correlation between environmental factors and drying rate and main nutrients content of alfalfa during natural drying

指标 Indicators	干燥速率 Drying rate	粗灰分 Crude ash (Ash)	粗蛋白 Crude protein (CP)	可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrate (WSC)	粗脂肪 Ether extract (EE)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF)	相对饲喂价值 Relative feeding value (RFV)
太阳辐射强度 Solar radiation intensity	0.381**	0.321**	0.161	-0.220*	0.098	0.149	0.165	-0.158
气温 Air temperature	0.539**	0.119	0.268*	-0.241*	0.251*	0.201*	0.224*	-0.224*
空气相对湿度 Air relative humidity	-0.055	-0.224*	-0.281**	-0.082	0.004	0.309**	0.359**	-0.349**
风速 Wind speed	0.203*	0.117	0.132	0.135	-0.117	-0.402**	-0.435**	0.451**
0~10 cm土壤含水量 Soil water content at 0-10 cm	-0.021	-0.041	0.263**	-0.659**	0.096	0.477**	0.451**	-0.490**

注: \*表示相关达0.05显著水平, \*\*表示相关达0.01极显著水平。

Note: \* indicate significant correlation at 0.05 level, \*\* indicate a extremely significant correlation at 0.01 level.

### 3 讨论

#### 3.1 田间晾晒苜蓿含水量和干燥速率的变化

苜蓿田间晾晒是将刈割后水分含量较高的新鲜饲草快速降低至18%左右安全贮藏含水量的过程,以40%左右水分含量为临界值,将其分为生理干燥和生化干燥2个阶段<sup>[26]</sup>。本研究中,供试的4茬机械刈割压扁苜蓿田间晾晒历时为31.5~74.5 h,短于刘丽英等<sup>[18]</sup>人工刈割未压扁的96~168 h晾晒历时,这可能与茎秆压扁能缩短30%~50%的晾晒时间<sup>[14]</sup>有关。试验第2、3、4茬苜蓿晾晒生理干燥阶段历时为26.5、7.5和10.0 h,分别占其晾晒历时的35.57%、23.81%和19.80%,而生化干燥阶段历时为48.0、24.0和40.5 h,生理干燥阶段历时小于生化干燥阶段,生化干燥阶段对苜蓿晾晒历时影响更大,这主要是因为苜蓿植株含水量在晾晒的初级阶段迅速降低,然后随晾晒时间的延续下降速度趋于缓慢<sup>[27]</sup>,使得生化干燥阶段历时为1~2 d<sup>[28]</sup>。同时,本研究中第1茬苜蓿生理干燥阶段历时为29 h,大于生化干燥阶段的26.5 h,王坤龙等<sup>[29]</sup>在辽宁的研究也出现了类似情况,其第1茬苜蓿

生理干燥阶段历时 32 h, 占晾晒历时的 61.53%, 这可能因两试验中 10 和 15 cm 的晾晒厚度阻碍了草茎中下部水分散失, 而在水分含量为 40% 时搂草扰动加速了晾晒苜蓿的水分散失, 致使生理干燥阶段历时大于生化干燥阶段。受季节影响, 第 2、3、4 茬晾晒苜蓿茎、叶片及全株在夜间均出现不同程度的返潮, 且在 5 到 9 月随收获季节的延续返潮程度加重, 在返潮过程中叶片的含水量增幅大于茎<sup>[29]</sup>。

干燥速率是晾晒过程中单位时间内水分的散失量。本研究中, 各茬苜蓿全株的干燥速率均介于茎和叶片之间, 但茎和叶片的干燥速率在晾晒过程中变化较为复杂, 各茬苜蓿自晾晒的第 2 天起, 茎、叶片及全株的干燥速率在白天均为先上升后下降的变化过程, 叶片的干燥速率峰值出现的比茎早, 在夜间干燥速率出现负值发生返潮时, 叶片的干燥速率比茎低, 表明叶片的返潮程度比茎严重<sup>[29]</sup>。同时, 在第 1、3 茬苜蓿晾晒的 0~29 h、0~24 h, 叶片的干燥速率高于茎, 而在 29.0~55.5 h、24.0~31.5 h 叶片的干燥速率低于茎; 而第 2、4 茬苜蓿晾晒 0~10 h 叶片的干燥速率高于茎, 在 10~53 h、10.0~26.5 h 叶片和茎的干燥速率互有高低, 而在 53.0~74.5 h、26.5~50.5 h 叶片的干燥速率低于茎, 这与刘丽英等<sup>[18]</sup>认为干燥前期叶的干燥速率高于茎, 而干燥后期叶的干燥速率低于茎相似, 但与海存秀<sup>[30]</sup>、Fonnesbeck 等<sup>[31]</sup>认为苜蓿在整个晾晒过程中, 叶片干燥速率比茎快的结论存在差异, 进一步表明茎和叶片的干燥速率在晾晒过程中变化的复杂性。同时, 在本研究中, 因夜间返潮而使第 1 茬晾晒苜蓿的叶片及第 2、3、4 茬晾晒苜蓿的茎、叶片及全株干燥速率出现了负值, 一定程度上延长了苜蓿田间晾晒历时。

### 3.2 田间晾晒苜蓿主要营养成分含量的变化

苜蓿在晾晒过程中, 随着植株含水量的下降, 常伴随着各种生理、生化过程而导致营养物质含量发生变化<sup>[32]</sup>, 缩短晾晒时间是提高营养物质保存率的关键<sup>[33]</sup>。本研究中, 苜蓿晾晒的 0~5 h 生理活跃阶段, Ash、WSC 和 NDF、ADF<sup>[18]</sup> 含量均有不同程度增加, EE 含量在部分茬次出现增加, 这与撒多文<sup>[34]</sup>认为在晾晒的 0~4 h 内 WSC、EE 含量增加和张颖超等<sup>[35]</sup>自然干燥的苜蓿在水分含量由 70% 下降到 50% 过程中 EE 含量增加 1.56% 的结论相一致, 但 NDF 和 ADF 含量变化与撒多文<sup>[34]</sup>在盐碱地晾晒苜蓿 NDF、ADF 含量均下降的结论不一致, 就现有的研究来看, 在苜蓿刈割后生理活跃阶段各营养物质含量的变化过程尚不能形成一致性结论。在晾晒始末、生理及生化干燥阶段, CP、WSC、EE 含量和 RFV 均呈下降态势, Ash、NDF 和 ADF 含量则表现为增加趋势, EE、RFV、WSC 的损失和 ADF、Ash、NDF 的增加主要发生在生理干燥阶段, 其损失率和增幅占比均大于 50%, CP 在生理干燥阶段的损失率占比仅为 24.18%~28.82%<sup>[36]</sup>, CP 的损失主要发生在生化干燥阶段。这与王坤龙等<sup>[29]</sup>认为苜蓿晾晒过程中粗蛋白、粗脂肪<sup>[34]</sup>和碳水化合物含量呈下降趋势<sup>[37]</sup>, 而 NDF、ADF 呈缓慢增加的结论相一致, 但其对各营养物质在晾晒始末及生理、生化干燥阶段的损失率或增幅未做定量论述; 同时, 本研究结果与刘丽英等<sup>[38]</sup>认为苜蓿在生理干燥阶段 CP 损失率占比为 24%~30% 的结论相一致, 但其认为 NDF、ADF 在生理干燥阶段上升率占比小于生化干燥阶段, 本研究结果与其相悖, 其自然干燥的 3 茬苜蓿生理干燥阶段历时均为 12 h, 而本研究取样的 4 茬苜蓿生理干燥阶段历时为 7.5~29.0 h, 可能与生理干燥阶段历时不同导致营养物质含量减少或增加的量不同有关。

### 3.3 环境因素与田间晾晒苜蓿干燥速率和营养成分含量的相关性

苜蓿晾晒过程中, 环境因素对干燥速率产生决定性影响。曹致中<sup>[26]</sup>认为影响苜蓿干燥速率的气候条件为: 太阳辐射强度 > 气温 > 空气湿度 > 风速, 刘丽英等<sup>[18]</sup>认为温度、空气湿度、太阳辐射强度及风速是影响苜蓿自然干燥的主要环境因素, 尹强等<sup>[21]</sup>认为对干燥速率影响的环境因素为: 太阳辐射强度、气温、大气水势、风速, 郑先哲等<sup>[39]</sup>对摊晒厚度与干燥速率的相关性进行研究, 认为在摊晒厚度较大时, 空气湿度对干燥速率的影响更显著, 王晶晶等<sup>[40]</sup>认为土壤湿度较大时也会导致返潮而降低苜蓿干燥速率。本研究表明, 各环境因素对干燥速率的影响为: 气温 > 太阳辐射强度 > 风速 > 空气相对湿度 > 0~10 cm 土壤含水量, 且气温、太阳辐射强度、风速与干燥速率呈极显著或显著的正相关关系, 而空气相对湿度和 0~10 cm 土壤含水量与干燥速率呈负相关关系, 但相关性不显著, 造成这种差异的主要原因与各试验开展的地域、苜蓿茬次及刈割时间、刈割方式、晾晒管理的不同有关。

苜蓿晾晒过程中, 营养物质含量与环境因素的相关性较为复杂。本研究中, Ash、CP、WSC、EE、NDF、ADF 含量及 RFV 均与太阳辐射强度、气温、空气相对湿度、风速及 0~10 cm 土壤含水量存在不同程度的相关性。其

中,太阳辐射强度、空气相对湿度为影响 Ash 含量的主要因素,气温、空气相对湿度、0~10 cm 土壤含水量为 CP 含量的主要影响因素,0~10 cm 土壤含水量、气温及太阳辐射强度为影响 WSC 含量的主要因素,而 EE 含量仅与气温呈显著正相关关系,0~10 cm 土壤含水量、风速、空气相对湿度及气温是影响 NDF、ADF 含量的主要因素,且与风速为负相关关系;影响 RFV 的主要环境因素为 0~10 cm 土壤含水量、风速、空气相对湿度和气温。这与刘丽英等<sup>[18]</sup>认为太阳辐射强度与 CP、NDF、ADF 含量和 RFV 相关性不显著的结论相似,造成这一现象的原因是晾晒苜蓿吸收了太阳辐射能的 80%,大部分能量被表层所吸收,在草垄表层 2 cm 以下的苜蓿能量吸收量仅为表层的 1/2,吸收的太阳能主要用于水分的蒸发和加热苜蓿草而提高干燥速率,进而间接影响干草营养成分含量的变化<sup>[41]</sup>。

#### 4 结论

苜蓿田间晾晒过程中,随收获季节的延续生理干燥阶段占晾晒历时的比例逐步减小,由第 1 茬的 52.25% 逐步下降为第 4 茬的 19.80%。各茬苜蓿全株的干燥速率均值为  $1.19\% \cdot h^{-1}$ ,介于茎的  $1.07\% \cdot h^{-1}$  和叶片的  $1.38\% \cdot h^{-1}$  之间,生理干燥阶段干燥速率为:叶片 > 全株 > 茎,生化干燥阶段干燥速率则为:茎 > 全株 > 叶片,且生理干燥阶段茎、叶片及全株干燥速率分别是生化干燥阶段的 1.79、7.69 和 3.43 倍。

CP、WSC、EE 含量和 RFV 在晾晒始末、生理及生化干燥阶段均下降,而 Ash、NDF 和 ADF 含量则为上升,但各营养物质的变化呈非线性的过程,EE、RFV、WSC 的损失和 Ash、NDF、ADF 的增加主要发生在生理干燥阶段,其损失率和增幅占比分别为 52.09%~75.00% 和 48.53%~62.94%,而 CP 的损失主要发生在生化干燥阶段,其损失率占比达 71.18%~75.82%。

环境因素对干燥速率的影响为:气温 > 太阳辐射强度 > 风速 > 空气相对湿度 > 0~10 cm 土壤含水量,且气温、太阳辐射强度、风速是影响干燥速率的主效因子;影响营养物质含量的主要环境因素为:气温、风速、空气相对湿度和 0~10 cm 土壤湿度,EE 仅与气温呈显著正相关关系。

#### 参考文献 References:

- [1] Lu X S. The quality and quantity issues of alfalfa products development. *China Dairy*, 2021(8): 9–12.  
卢欣石. 苜蓿饲草产业发展的质与量问题. *中国乳业*, 2021(8): 9–12.
- [2] Chen Z H, Wang J T. *China grassland statistics 2022*. Beijing: China Agricultural Press, 2024: 50–51.  
陈志宏,王加亭. 中国草业统计 2022. 北京: 中国农业出版社, 2024: 50–51.
- [3] Li C J, Guo Q, Wang Z X. Study on the demand of alfalfa grass import in China. *China Feed*, 2025(3): 145–150.  
李翠锦,郭琦,王姿璇. 我国苜蓿草进口需求研究. *中国饲料*, 2025(3): 145–150.
- [4] Li J Q, Yan K Y, Liu Z Y, *et al.* Development status and countermeasures of high quality and high yield alfalfa in China. *China Feed*, 2021(11): 95–98.  
李竞前,闫奎友,柳珍英,等. 我国优质高产苜蓿发展状况及对策建议. *中国饲料*, 2021(11): 95–98.
- [5] Diao C, Wang W X. The trade pattern of alfalfa importation into China and its influencing factors. *Pratacultural Science*, 2023, 40(9): 2424–2434.  
刁婵,王文信. 中国苜蓿草进口贸易格局及其影响因素. *草业科学*, 2023, 40(9): 2424–2434.
- [6] Yu C Q, Rong H, Sun W, *et al.* Research progress on technologies for hay making and storage. *Pratacultural Science*, 2010, 27(8): 143–150.  
余成群,荣辉,孙维,等. 干草调制与贮存技术的研究进展. *草业科学*, 2010, 27(8): 143–150.
- [7] Guo Z G, Zhang Z H, Wang S M, *et al.* Study on adaptability of nine lucerne varieties in hills and valleys of Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(4): 45–50.  
郭正刚,张自和,王锁民,等. 不同紫花苜蓿品种在黄土高原丘陵区适应性的研究. *草业学报*, 2003, 12(4): 45–50.
- [8] Bi S Y, Cao J, Li Y, *et al.* Effects of different combination of water and fertilizer on alfalfa quality. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 105–113.  
毕舒贻,曹婧,李跃,等. 不同水肥组合对苜蓿品质的影响. *草地学报*, 2018, 26(1): 105–113.
- [9] Zhao J M. Common diseases and pests of alfalfa and green prevention technology. *China Cattle Science*, 2017, 43(3): 46–48.

- 赵剑鸣. 紫花苜蓿常见病虫害种类及绿色防控技术. 中国牛业科学, 2017, 43(3): 46—48.
- [10] Wang Z J, Gegentu, Liu L Y, *et al.* Effect of cutting time on chlorophyll content and nutritional quality of alfalfa hay. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(9): 52—59.  
王志军, 格根图, 刘丽英, 等. 刈割时间对苜蓿干草叶绿素含量和营养品质的影响. 中国草地学报, 2021, 43(9): 52—59.
- [11] Alhidary I A, Abdelrahman M M, Alyemni A H, *et al.* Effect of alfalfa hay on growth performance, carcass characteristics, and meat quality of growing lambs with *ad libitum* access to total mixed rations. Brazilian Journal of Animal Science, 2016, 45(6): 302—308.
- [12] Hou W Y. Brief talk on the harvest technology of alfalfa hay. Mechanization of Rural and Pastoral Areas, 2003(3): 16—18.  
候武英. 浅谈苜蓿干草收获技术. 农村牧区机械化, 2003(3): 16—18.
- [13] Li Y Y, Ge G T, Jiang X W, *et al.* Effect of rain and thickness of grass strip on the drying characteristics and nutrition quality of natural grass hay. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5): 1419—1424.  
李宇宇, 格根图, 降晓伟, 等. 雨淋及草条厚度对天然牧草干草干燥特性和营养品质的影响. 草地学报, 2019, 27(5): 1419—1424.
- [14] Liu X Y. Study of the production technique of high quality alfalfa bale processing. Pratacultural Science, 2001, 18(2): 8—10.  
刘兴元. 优质苜蓿草捆加工生产技术的研究. 草业科学, 2001, 18(2): 8—10.
- [15] Gmcarevic M. Effect of various dipping treatments on the drying rate of grapes for raisins. American Journal of Enology and Viticulture, 1963, 14: 230—234.
- [16] Gao C X, Wang P, Gao Z S. The influence of moisture content before baling on alfalfa hay quality and yield. Acta Agrestia Sinica, 1997, 5(1): 27—32.  
高彩霞, 王培, 高振生. 苜蓿打捆前的含水量对营养价值和产草量的影响. 草地学报, 1997, 5(1): 27—32.
- [17] Zhang X N. Study on drying mechanism and additives storage technology of alfalfa. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010: 103.  
张晓娜. 苜蓿助干机制及添加剂贮藏技术的研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010: 103.
- [18] Liu L Y, Jia Y S, Fan W Q, *et al.* An investigation of the main environmental factors affecting the natural drying of alfalfa for hay, and hay quality. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 121—132.  
刘丽英, 贾玉山, 范文强, 等. 影响苜蓿自然干燥的主要环境因子研究. 草业学报, 2022, 31(2): 121—132.
- [19] Du J M, Wang Z J, Yu H Q, *et al.* Screening and safety evaluation of herbicides for forage sorghum and silage corn strip intercropping. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry, 2024, 65(3): 18—22.  
杜建民, 王占军, 俞鸿千, 等. 饲用高粱、青贮玉米带状间作苗后除草剂筛选及安全性评价. 宁夏农林科技, 2024, 65(3): 18—22.
- [20] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods. Beijing: Science Press, 2012: 78—80.  
张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012: 78—80.
- [21] Yin Q, Wu H X, Wang Z J, *et al.* Influence of environmental factors on field natural drying of alfalfa. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(1): 188—195.  
尹强, 武海霞, 王志军, 等. 环境因子对苜蓿田间自然干燥的影响. 草地学报, 2013, 21(1): 188—195.
- [22] Liu L Y. Study on the response mechanism of environmental factors on nutrients and field regulation strategy in the process of alfalfa drying. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.  
刘丽英. 苜蓿干燥过程中环境因子对营养物质的影响机制及田间调控策略研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [23] Wang B, Zhang Z, Yin Z, *et al.* Novel and potential application of cryopreservation to plant genetic transformation. Biotechnology Advances, 2012, 30(3): 604—612.
- [24] Yang S. Feed analysis and quality test technology. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993: 15—98.  
杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 15—98.
- [25] Wang B, Yang Y Q, Li M Y, *et al.* The effect of sowing rate and row spacing on the yield and quality of alfalfa in the Ningxia Yellow River irrigation area. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 147—158.  
王斌, 杨雨琦, 李满有, 等. 不同播种量下行距配置对紫花苜蓿产量及品质的影响. 草业学报, 2022, 31(2): 147—158.
- [26] Cao Z Z. Herbalism. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 8—10.  
曹致中. 草产品学. 北京: 中国农业出版社, 2005: 8—10.
- [27] Wang C H, Yang J Q, Dong K H, *et al.* Effects of different cutting ways on the nutritive value of alfalfa meal. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(3): 140—142.

- 王常慧, 杨建强, 董宽虎, 等. 不同刈割方式对苜蓿草粉营养价值的影响研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 140-142.
- [28] Chen H. Reasonable sun-curing and baling technology of alfalfa. *Contemporary Animal Husbandry*, 2002, 24(4): 31-33.  
陈辉. 紫花苜蓿合理晒制打捆技术. 当代畜牧, 2002, 24(4): 31-33.
- [29] Wang K L, Wang Q Y, Wang D, *et al.* Study on the quality change in alfalfa drying process. *China Feed*, 2016(10): 15-18.  
王坤龙, 王千玉, 王迪, 等. 苜蓿干燥过程中质量变化规律研究. 中国饲料, 2016(10): 15-18.
- [30] Hai C X. The influence of the different drying methods on nutritive value of alfalfa in high plateau area. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2007, 34(5): 26-28.  
海存秀. 高寒地区不同干燥法对紫花苜蓿营养价值的影响. 中国畜牧兽医, 2007, 34(5): 26-28.
- [31] Fannesbeck P V, Carcia M M, Latis W H, *et al.* Estimating yield and nutrient losses due to rainfall on field-drying alfalfa hay. *Animal Feed Science and Technology*, 1986, 16(1): 7-15.
- [32] Coblentz W K, Coffey K P, Young A N, *et al.* Storage characteristics, nutritive value, energy content, and in vivo digestibility of moist, large rectangular bales of alfalfa-orchardgrass hay treated with a propionic acid-based preservative. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(4): 2521-2535.
- [33] Xu W, Shi S L. Effect of different processing methods on the quality of alfalfa hay. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 2013, 12(6): 689-693.
- [34] Sa D W. Study on the characteristics of nutritional quality changes and fungal community structure of alfalfa after cutting in saling-alkali soil. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021: 50-56.  
撒多文. 盐碱地紫花苜蓿刈割后营养品质变化特征与真菌群落结构研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021: 50-56.
- [35] Zhang Y C, Wang W, Hou M L, *et al.* Effect of different drying methods on alfalfa hay modulation. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(1): 76-82.  
张颖超, 王伟, 候美玲, 等. 不同干燥方法对苜蓿干草调制的影响. 中国草地学报, 2015, 37(1): 76-82.
- [36] Jia Y S, Gegentu. Grass products form northern China. Beijing: Science Press, 2013: 68-70.  
贾玉山, 格根图. 中国北方草产品. 北京: 科学出版社, 2013: 68-70.
- [37] Guo J Z. Quality changes in alfalfa hay during curing and storage period. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009: 42-45.  
郭江泽. 苜蓿青干草在调制和贮藏过程中的质量变化规律研究. 郑州: 河南农业大学, 2009: 42-45.
- [38] Liu L Y, Jia Y S, Wang Z J, *et al.* The law and correlation of chlorophyll and nutrient content changes during alfalfa drying. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(11): 60-68.  
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. 中国草地学报, 2021, 43(11): 60-68.
- [39] Zheng X Z, Wang J Y, Dong H F, *et al.* Effect of drying conditions on the quality characteristics of alfalfa forage. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(6): 101-105.  
郑先哲, 王建英, 董航飞, 等. 干燥条件对苜蓿品质指标的影响. 东北农业大学学报, 2009, 40(6): 101-105.
- [40] Wang J J, Tong L G, Wang L. Effect of air humidity on alfalfa dehydration speed. *Grassland and Turf*, 2007(3): 17-24.  
王晶晶, 童莉葛, 王立. 湿度对紫花苜蓿干燥速率的影响. 草原与草坪, 2007(3): 17-24.
- [41] Moot D J, Hargreaves J, Brown H E, *et al.* Calibration of the APSIM-lucerne model for 'Grasslands Kaituna' lucerne crops grown in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2015, 58(2): 190-202.