

牧草湿法收获工艺与装备系统评价*

杨世昆 杜建强 刘贵林 吴雅梅

(中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010010)

摘要: 针对牧草干法收获工艺所存在的牧草干物质损失大和营养成分保持率低的问题,进行了原理剖析和配套装备设计,提出牧草湿法收获工艺。阐述了牧草湿法收获工艺的技术原理、工艺路线、关键装备,进行了牧草干法收获与湿法收获对比试验,试验结果表明了牧草湿法收获工艺的先进性。

关键词: 牧草 干法收获工艺 湿法收获工艺 关键装备 对比试验

中图分类号: S817.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0086-05

System Evaluation on Harvesting Process and Key Equipments for Green Grass

Yang Shikun Du Jianqiang Liu Guilin Wu Yamei

(Huhhot Branch, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010010, China)

Abstract: In order to solve the problem of large loss in herbage dry and low retention of nutrition for dry harvesting technology process, theory analysis and equipment design was carried out. Wet harvesting technology process was proposed. The technology theory, process route and key equipment were described. Comparisons of dry harvesting technology process and wet harvesting technology process were performed. The results showed the advancement of wet harvesting technology process.

Key words: Forage grass Dry harvesting technology process Wet harvesting technology process Key equipments Contrast test

引言

长期以来,在收获和制备干草的过程中,牧草干法收获工艺一直是我国牧草收获的主体工艺,牧草干法收获工艺的最大缺点是牧草干物质损失大和营养成分保持率低。根据农业部有关部门统计,我国每年打贮草大约在3亿t^[1],可见其损失很大。本文通过对传统牧草干法收获所存在的损失问题,进行原理剖析和配套装备的设计,提出牧草湿法收获工艺,并从技术原理、工艺路线、关键装备以及牧草干法收获与湿法收获对比试验效果等方面系统论述牧草湿法收获工艺先进性和关键装备的优越性。

1 传统牧草干法收获工艺及其存在的问题

牧草干法收获工艺的基本概念是:被刈割的牧

草在田间晾晒到安全水分(17%)后进行加工处理及贮存。现行的牧草干法收贮工艺主要有3种。第1种是传统的长散草收贮工艺:割草、晾晒后搂草条(有时雨后还要由人工用草叉翻晒)、集草器将草条集成小堆、人工就地堆垛、收获季节结束后将小垛草装车运到厩舍附近人工堆成大垛存放。第2种是散干草收贮新工艺:割草、晾晒后搂草条、翻晒、散草捡拾运输车捡拾草条并运输到指定地点堆垛加覆盖贮存。第3种是方草捆(圆草捆)收贮工艺:割草、晾晒后搂草条、翻晒、捡拾压捆机捡拾草条压制草捆并运输到指定地点贮存。采用干法收获工艺处理的牧草各个作业环节的损失是:收获及运输过程中牧草的损失率达3%~15%(苜蓿草损失率达25%~30%,主要是花和叶的损失),取饲过程中损失3%~5%,由于雨水冲刷和风吹日晒导致牧草变质而造成

收稿日期: 2013-06-26 修回日期: 2013-07-10

* 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2013MS0727)

作者简介: 杨世昆,研究员,博士生导师,主要从事太阳能利用技术及干燥装备研究,E-mail: yskun001@sohu.com

通讯作者: 刘贵林,研究员,博士生导师,主要从事太阳能干燥技术及装备研究,E-mail: lgl527@sohu.com

牧草营养成分损失在 20% ~ 30%。传统的长散草收贮工艺牧草营养成分损失可高达 50%^[2]。

2 牧草收获工艺的损失分析

牧草收获工艺的试验研究主要是针对牧草在收获加工过程中的“质”与“量”进行的,“质”主要是指牧草在干燥过程中营养物质的变化规律与损失特征,“量”主要是指牧草在收获加工过程中干物质损失程度。

从“质”的角度来讲,刈割后的牧草若能迅速脱水,使植物细胞尽快死亡,减少饥饿代谢所造成的营养消耗,尽可能钝化参与分解营养物质的酶的作用,牧草中的营养物质就能获得最大限度的保持。牧草刈割后的干燥过程是一个比较复杂的生理生化过程,一般将其分为 2 个阶段。第 1 阶段是以活体细胞异化作用为主导的代谢阶段,在这个阶段内水分散失快,营养成分损失相对少。第 2 阶段是以植物细胞生化作用为主的过程,在这个阶段中,植物散失的水分主要是物理-化学形水,是以角质层蒸发为主,因此牧草水分散失速度慢。植物细胞死亡之后,体内的生理作用逐渐被有酶参加的生化作用所取代,如果干燥速度慢,酶的活性会加强,蛋白质的分解会加剧,此时加快干燥速度是减少牧草营养成分损失的最佳办法。另外,牧草第 2 阶段在田间干燥还将面临光化学作用与雨淋霉变所带来的损失。牧草在晒制过程中强烈的阳光直射和植物体内氧化酶的作用,使植物体内胡萝卜素、叶绿素、维生素 C 和维生素 B 等营养元素大部分被分解。雨淋霉变所带来的损失也是很大的,磷大约损失 30%,碳酸钠损失 65%,矿物质损失 67%,碳水化合物损失 37%^[3-4]。

从“量”的角度来讲,牧草从收割开始,经过翻晒、搂条、捡拾及运输过程中牧草在每一个作业环节都有“量”的损失(豆科牧草损失率更大,主要是花和叶的损失),取饲过程中还有损失,所以采用先进的牧草收获工艺,将刈割后牧草的干物质的损失程度降至最低。

3 牧草湿法收获工艺关键环节和配套装备研究

3.1 割草翻晒环节

3.1.1 损失原因

牧草收获损失首先发生在搂草翻晒环节,传统收获工艺采用往复式割草机将牧草割倒,在田间晾晒,然后再翻晒,这就造成第一步损失,由于苜蓿干燥中一个问题就是茎叶干燥不同步,即叶降至安全

水分时茎秆的水分还很高,如果继续干燥就会使叶干燥过度,造成营养损失。

由图 1 可看出,叶的水分随时间变化明显比茎秆快,这主要是由苜蓿的生长特性及形状特性引起的。苜蓿植株体内的各部位不仅含水率不同,而且它们的散水强度也不同,故苜蓿各部位的干燥速度不均匀。叶片较薄,表面积大,水分从内层细胞向外移动的距离比茎秆短得多,而且阻力也较小,故叶片干燥速度比茎快得多,同等干燥条件下叶降到安全水分所需时间约为茎秆的 1/3 ~ 1/2,即茎、叶间存在干燥不同步问题,为提高苜蓿的干燥质量,必须解决这个问题。叶、茎秆破碎和未破碎曲线对比如图 2 所示。

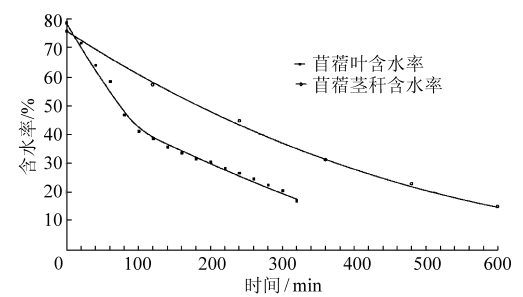


图 1 茎叶干燥速度对比

Fig. 1 Comparison of dry speed for stem and leaf

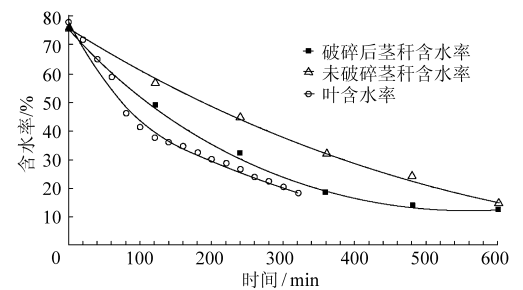


图 2 叶、茎秆破碎和未破碎曲线对比

Fig. 2 Curves of leaves, stems broken and unbroken

从图 2 可看出破碎茎秆可使干燥速度提高。降至安全水分所需时间由长到短是:未破碎茎秆、破碎茎秆、叶。试验表明,茎秆破碎会缩短达到安全水分的时间,加快茎秆的干燥速度,因此茎秆破碎是解决茎、叶不同步的有效措施。

3.1.2 装备解决

基于牧草表里散失水分速率不同的特性,对收获工艺进行改进,配套装备采用切割压扁机,对牧草首先实施切割、压扁、集拢铺条三合一技术和茎秆压扁破碎技术,有效缩短田间干燥时间。中国农机院呼和浩特分院自行研制的切割压扁机关键部件包括牧草低损收割台、浮动式柔性压扁调制辊、仿形浮动装置,如图 3 所示。其中收割台采用悬吊式摆杆机构,并配合运动轨迹可变拨禾轮实现了牧草无倒伏

顺序切割喂入。浮动式柔性压扁调制辊采用一对对称反向螺旋凸纹宽幅直径不同的橡胶压扁辊和钢制压扁辊组成,可根据牧草喂入量不同,实现柔性压扁、破碎,其独特的设计能最大限度保护牧草的营养成分。仿形浮动装置配合可调式仿形滑掌实现了割台水平和垂直方向的仿形和稳定性,使割台更好地适应复杂多变的田间条件,减少土壤压实^[5]。

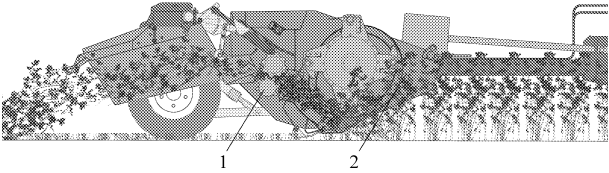


图3 切割压扁机工作原理图

Fig.3 Machine principle of cutting flattening

1. 浮动式柔性压扁装置 2. 低损收割台

3.2 捡拾收获环节

3.2.1 损失原因

牧草收获损失第2步发生在牧草的捡拾环节,传统收获工艺为牧草在田间晾晒至安全水分(17%)时,然后再捡拾,这就又造成损失,由于苜蓿水分降到17%后,牧草本身会变得特别脆,尤其是牧草中最有营养价值的花和叶极易从植株本体上掉落下来,当进行机械化捡拾作业时大量的花叶掉落到土壤里,造成营养损失。使用传统捡拾收获工艺收获含水率为17%的散苜蓿,捡拾干物质损失率为23.1%,捡拾打成苜蓿草捆干物质损失率为20.2%。因为叶片的蛋白质含量占整株的70%以上,其消化能占整株的65%以上,胡萝卜素占90%以上。新工艺应避免牧草水分过于低时再进行捡拾收获,实验表明,整株苜蓿草在含水率40%时的韧性是整个干燥过程中最强的时段,较刚收割时的苜蓿草的韧性强。因此使苜蓿干物质损失率达到最小的收获时段为含水率40%。

3.2.2 配套装配评价

牧草田间晾晒水分降到40%时再进行捡拾收获,此时牧草韧性最强,因此干物质损失最低,这就需要深入研究收获装备的关键部件捡拾器,要求提高捡拾收获部件的剪切防缠绕的能力同时减少漏捡区域,这是提高苜蓿草损失的有效方法。

所设计的弹齿捡拾器主要结构参数为:捡拾器理论工作幅宽 $B \geq 1\,900\text{ mm}$,捡拾器滚筒转速 $n_1 = 137\text{ r/min}$,弹齿间距 $b = 66\text{ mm}$,弹齿最小离地间隙 $\delta \leq 20\text{ mm}$ 。从运行轨迹图4中可以看出,机器行进0.6 m的作业过程中,捡拾器弹齿端部运行轨迹从 $a_0 \sim a_8$,A、B、C点之间的空间对捡拾草条质量有很大影响,最显著的是A点到BC连线的垂直距离为

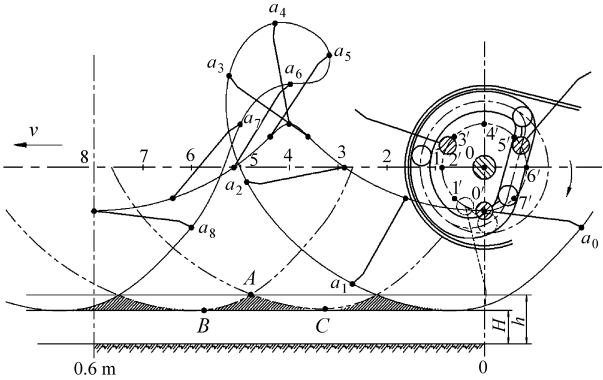


图4 捡拾器弹齿运行轨迹图

Fig.4 Trajectory diagram of pickup tooth

$h - H$ 。根据试验数据,当弹齿与地面的距离 H 为50 mm时, $h - H$ 小于20 mm可以保证漏捡率低于2%,完全可以避免牧草在地面堆积、漏捡和缠绕。

捡拾收获装备主要有散草捡拾运输车、草捆捡拾打捆机,如图5所示。

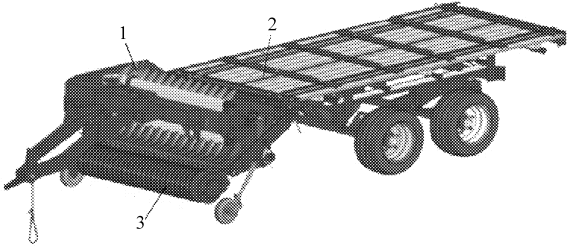


图5 散草捡拾运输车关键部件原理图

Fig.5 Schematic of key parts of scattered grass pickup truck

1. 拨叉喂入装置 2. 链板推送装置 3. 弹齿捡拾装置

散草捡拾运输车重点突破弹齿捡拾技术、拨叉喂入技术、链板推送装车、卸车技术。该机的捡拾器和喂入切碎装置布局合理,结构紧凑。牧草从地面捡拾起来后由喂入切碎装置直接喂入车厢入口,牧草始终沿着机器纵向轴线流动,捡拾、喂入阻力小,牧草流动更为顺畅,从而减少牧草捡拾损失、提高机器的喂入量和生产率^[6]。

如图6所示,方草捆捡拾打捆机重点突破了防缠绕喂入装置和宽幅低平低损捡拾装置,成功解决了牧草高效收获不缠绕、低损失捡拾和较高密度草捆中部通气性技术。独特的草捆压缩及密度控制技术

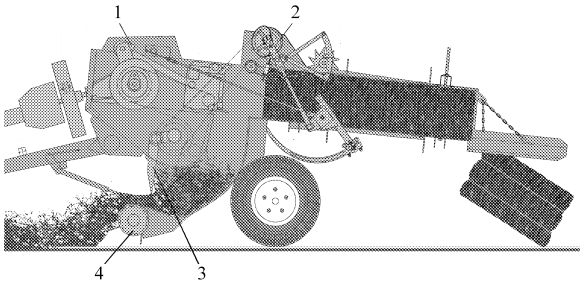


图6 方草捆捡拾打捆机工作原理示意图

Fig.6 Square bale pickup baler working principle

1. 压缩机构 2. 打捆机构 3. 喂入机构 4. 捡拾装置

术,实现了不同含水率牧草打捆时的密度均匀一致,既保证了草捆的较高密度又保证了草捆中部通气性,满足干燥工艺要求。

3.3 干燥环节

3.3.1 干燥环节必要性

通过以上的装备对牧草在含水率 40% 时进行了捡拾收获,极大地减少了牧草营养物质的损失,但是此时牧草含水率还很高,由于当牧草水分降至 40% 以下时,植物细胞开始死亡,直至水分降到 17% 左右。植物细胞死亡之后,体内的生理作用逐渐被有酶参加的生化作用所取代,适宜的苜蓿草层温度使酶的活性加强,如果干燥速度慢,蛋白质和胡萝卜素的分解会加剧,而且产生霉变所带来的损失也是很大的,磷大约损失 30%,碳酸钠损失 65%,矿物质损失 67%,碳水化合物损失 37%。针对牧草在干燥过程中营养物质的变化规律与损失特征,将收获后的牧草采用目前国内最先进的太阳能饲草干燥成套设备进行干燥。太阳能饲草干燥技术具有环保、快速和低温干燥的显著技术优势,如草捆干燥设备,将草捆含水率的 40% 降至 17%,干燥时间大约在 4 h,使牧草中的营养成分获得了有效保持;由于太阳能饲草干燥技术采用低温干燥的先进技术,克服了高温干燥所产生的芳香性氨基酸挥发严重,一些蛋白质发生变性的不足,使草产品具有芳香的青草味、蛋白质消化率高、适口性好和家畜的消化能摄入量高。另外,太阳能饲草干燥技术避免了牧草在田间干燥光化学作用与雨淋霉变所带来的损失^[7]。

3.3.2 配套装备评价

太阳能草捆干燥设备其特征是太阳能空气集热器与房顶设计为一体,草捆干燥是在干燥仓内进行,太阳能加热的空气通过风机从干燥仓底部吹入,整个干燥过程实现了计算机自动控制。该设备设计时不仅考虑了太阳能干燥、草捆的暂存空间,同时也考虑了饲草的进一步深加工(压块、包装、装卸等)设备的位置^[8~9],如图 7 所示。

太阳能散草干燥设备在作业时,先将待干燥的苜蓿草均匀地堆放在干燥仓内,起动风机,被太阳能集热器加热的空气通过风道进入空气分配筛,在风压的作用下,热空气透过草层并从草层上部释出,进入大气,热风通过草层时饲草中的水分被带走,即达到干燥的目的。其干燥原理如图 8 所示^[10]。

太阳能草捆和散草干燥成套设备研制成功,极大地缩短了牧草含水率从 40% 降到 17% 所需的时间,从而极大地降低了牧草自身的代谢损失、外界阳光长时间照射的分解损失和遇到雨淋所造成的霉变损失。

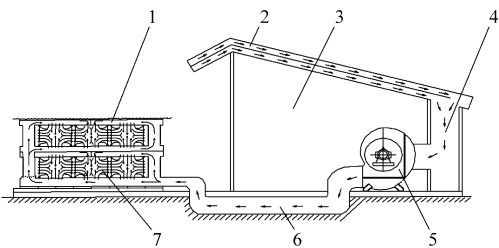


图 7 太阳能草捆干燥设备及厂房总体方案
Fig. 7 Solar drying equipment of grass and overall program of plant

1. 草捆干燥仓 2. 太阳能空气集热器 3. 储草仓 4. 风道
5. 风机 6. 地下风道 7. 草捆

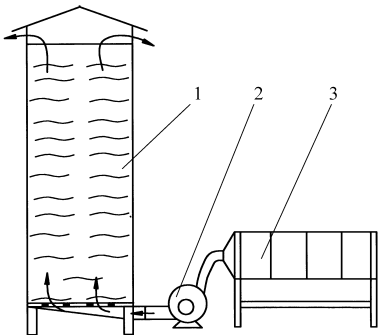


图 8 太阳能散草干燥设备原理图
Fig. 8 Drying equipment structure of solar energy forage
1. 饲草 2. 风机 3. 太阳能集热器

4 牧草湿法收获工艺

牧草湿法收获工艺的基本概念是:被刈割的牧草在田间晾晒到 40% 左右含水率时进行加工处理及贮存,牧草的后干燥阶段在加工处理(散草、草捆)后进行。牧草湿法收获工艺的最大优点是牧草干物质损失小和营养成分保持率高。

牧草湿法收获工艺过程是:割草(对豆科类牧草进行压扁处理)、晾晒后搂草条、翻晒、在牧草的含水率降至 40% 左右时,散草捡拾运输车捡拾草条(捡拾压捆机捡拾草条压制草捆)并运输到指定地点用太阳能干燥设备进行干燥作业。

牧草湿法收获工艺针对牧草的贮存形式分为两种形式。一种是长散草收获工艺。一种是成型草捆(方草捆、圆草捆)收获工艺。针对 2 种不同的收获工艺,中国农科院呼和浩特分院研究开发了两套系统集成化收获设备。

4.1 两种牧草湿法收获工艺及装备

长散草收获工艺:切割压扁机将生长的牧草切割压扁之后由搂草机将牧草搂成草条,然后翻晒机将草条翻晒,散草捡拾运输车将自然晾晒到含水率 40% 左右的草条捡拾存放到饲草仓内并运输长散草到指定地点,由太阳能散草干燥设备将长散草进行烘干,当长散草干燥到含水率 17% 左右进行贮存。

成型草捆湿法收获工艺:切割压扁机将生长的牧草切割压扁之后由搂草机将牧草搂成草条,然后翻晒机将草条翻晒,方草捆捡拾压捆机(圆草捆卷捆机)将自然晾晒到含水率 40% 左右的草条打成草捆,运输成型草捆到指定地点,太阳能草捆干燥设备将成型草捆进行烘干,成型草捆干燥到含水率 17% 左右进行贮存。

长散草湿法收获工艺采用的作业机具主要有切割压扁机、旋转式搂草机、翻晒机、散草捡拾运输车 and 太阳能散草干燥设备。

成型草捆湿法收获工艺采用的作业机具主要有切割压扁机、旋转式搂草机、翻晒机、方草捆捡拾压捆机(圆草捆卷捆机)和太阳能草捆干燥成套设备。

4.2 两种牧草湿法收获工艺机具工作流程

牧草湿法收获工艺流程图如图 9 所示。

5 牧草干法收获与湿法收获对比试验

我国苜蓿一年收获 2~4 茬,试验地选在鄂尔多斯市乌审旗每年苜蓿收获 3 茬,累计收割时间 45 d,各个试验必须首先进行了试验方案设计,选择面积

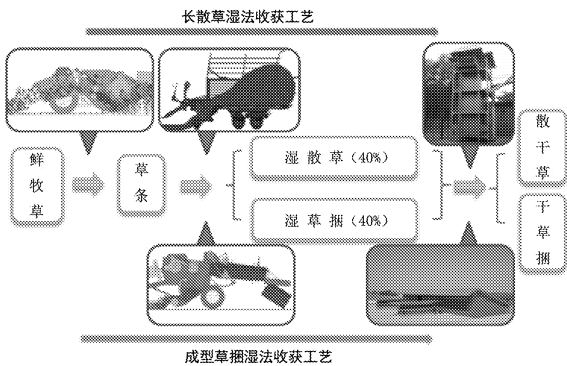


图 9 牧草湿法收获工艺流程图

Fig. 9 Flow sheet of grass wet harvest process

相同的 10 块牧草种植地,其中 5 块种植苜蓿草且长势基本一样的,另外 5 块种植禾本科牧草,长势基本一致,对每种牧草 5 块种植地从割草开始,分别用长散草收贮工艺(干法)、散干草收贮新工艺(干法)、方草捆收贮工艺(干法)、散草收获工艺(湿法)和方草捆收获工艺(湿法)5 种收贮工艺同时进行收贮,最后对每种收贮工艺的牧草进行营养成分的检测,最终得到牧草干物质与营养成分损失有关数据^[11]如表 1 所示。

表 1 牧草干物质与营养成分损失
Tab.1 Nutrition loss and forage grass

收贮工艺	禾本科牧草田间晾晒	苜蓿草田间晾晒	禾本科牧草田间收获	苜蓿草田间收获	禾本科牧草太阳能干燥	苜蓿草太阳能干燥
	晒营养成分损失	营养成分损失	收获干物质损失	干物质损失	干燥营养成分损失	燥营养成分损失
长散草(干法)	50	50	15	30		
散干草(干法)	25~30	25~30	5	25~30		
方草捆(干法)	25~30	25~30	3	25~30		
散草(湿法)	5	5	≤1	≤2	≤5	≤5
方草捆(湿法)	5	5	≤1	≤2	≤3	≤3

6 结束语

从牧草干法收获与湿法收获对比试验效果可以看出,牧草湿法收获工艺与传统的长散草收贮工艺相比,可减少干物质损失近 30%,饲草的有效营养

成分保存率由 50% 提高到 90% 以上。试验证明,将刈割后豆科(苜蓿)牧草水分降至 40% 左右时进行打捆作业,苜蓿的花和叶基本保持完好,在整个收获加工作业中干物质的损失不超过 2%,充分体现了牧草湿法收获工艺的先进性。

参 考 文 献

1 董宽虎,沈益新. 饲草生产学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
2 杨世昆,苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社,2009.
3 董宽虎,王常慧,牧原. 干燥方法对苜蓿草粉营养价值的影响[J]. 草地学报,2003,11(4):334~337.
Dong Kuanhu, Wang Changhui, Mu Yuan. Effects of different drying methods on the nutritive value of alfalfa meal[J]. Acta Agrectir Sinica,2003,11(4):334~337. (in Chinese)
4 高彩霞,王培. 收获期和干燥方法对苜蓿干草质量的影响[J]. 草地学报,1997,5(2):113~116.
Gao Caixia, Wang Pei. Effect of various harvest time and drying methods on nutritive value of alfalfa hay[J]. Acta Agrectir Sinica, 1997,5(2):113~116. (in Chinese)
5 杨世昆,敖恩查,贾红燕,等. 饲草切割压扁机:中国,ZL200520012277. 2[P]. 2005-04-01.
6 刘贵林,敖恩查,贾红燕,等. 饲草捡拾压捆机:中国,ZL200520012187. 3[P]. 2005-03-29.

Society for Agricultural Machinery,2008,39(3):187~190. (in Chinese)

11 Zhang M, Sword M L, Buckmaster D R, et al. Design and evaluation of a corn silage harvester using shredding and flail cutting [J]. Transactions of the ASAE, 2003,46(6):1503~1511.

12 Shinnors K J, Koegel R G, Pritzl P J. An upward cutting cut-and-throw forage harvester to reduce machine energy requirements [J]. Transactions of the ASAE,1991,34(6):2287~2290.

13 陈艳军, 吴科斌,张俊雄,等. 玉米秸秆力学参数与抗倒伏性能关系研究[J]. 农业机械学报, 2011,42(6):89~92. Chen Yanjun, Wu Kebin, Zhang Junxiong, et al. Relationship between corn lodging resistance and mechanical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):89~92. (in Chinese)

14 高梦祥,郭康权,杨中平,等. 玉米秸秆的力学特性测试研究 [J]. 农业机械学报,2003,34(4):47~52. Gao Mengxiang, Guo Kangquan, Yang Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(4):47~52. (in Chinese)

15 吴子岳,高焕文,张晋国. 玉米秸秆切断速度和切断功耗的试验研究[J]. 农业机械学报,2001,32(2):38~41. Wu Ziyue, Gao Huanwen, Zhang Jinguo. Study on cutting velocity and power requirement in a maize stalk chopping process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(2):38~41. (in Chinese)

16 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报,2007,38(7):172~176. Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(7):172~176. (in Chinese)

17 贾洪雷,王增辉,马成林,等. 玉米秸秆切碎抛送装置的试验研究[J]. 农业机械学报,2003,34(6):96~99. Jia Honglei, Wang Zenghui, Ma Chenglin, et al. Chopping and throwing mechanism of corn straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(6):96~99. (in Chinese)

18 翟之平,王春光. 叶片式抛送装置气流流场数值模拟与优化[J]. 农业机械学报,2008,39(6):84~87. Zhai Zhiping, Wang Chunguang. Numerical simulation and optimization for air flow in an impeller blower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):84~87. (in Chinese)

19 黄思,王国玉. 离心泵内流场非对称性及受力的三维数值分析[J]. 农业机械学报,2006,37(10):66~69. Huang Si, Wang Guoyu. Analysis of flow field asymmetry and force on centrifugal pump by 3-D numerical simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):66~69. (in Chinese)

20 李国威,王岩,吕秀丽,等. 偏置短叶片离心泵内三维流场数值模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(7):151~155. Li Guowei, Wang Yan, Lü Xiuli, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow field in centrifugal pump with deviated short splitter vanes [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):151~155. (in Chinese)

21 李伟,施卫东,蒋小平,等. 多级离心泵轴向力的数值计算与试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(23):52~59. Li Wei, Shi Weidong, Jiang Xiaoping, et al. Numerical calculation and experimental study of axial force on multistage centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23):52~59. (in Chinese)

22 李晓俊,袁寿其,潘中永,等. 基于结构化网格的离心泵全流场数值模拟[J],农业机械学报,2013,44(7):50~54. Li Xiaojun, Yuan Shouqi, Pan Zhongyong, et al. Numerical simulation of whole flow field for centrifugal pump with structured grid [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):50~54. (in Chinese)

(上接第 90 页)

7 王常慧,杨建强,王永新,等. 不同收获期及不同干燥方法对苜蓿草粉营养成分的影响[J]. 动物营养学报,2004,16(2):60~64. Wang Changhui, Yang Jianqiang, Wang Yongxin, et al. Effects of the different harvesting time and different drying ways on nutrient levels in alfalfa meal[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2004,16(2):60~64. (in Chinese)

8 杨世昆,刘贵林,贾红燕,等. 梯形板式太阳能空气集热器:中国,ZL200520104433.8[P]. 2005-08-12.

9 杨世昆,刘贵林,杜建强,等. 太阳能草捆干燥设备:中国,ZL200710300870.0[P]. 2007-12-29.

10 杨世昆,杨文大,刘贵林,等. 交替供热式太阳能饲草干燥设备:中国,ZL200320124589.3[P]. 2003-11-14.

11 何月娥,杨孝文,张梧邨. 农机试验设计[M]. 北京:机械工业出版社,1986.

12 罗运俊,何梓年,王长贵. 太阳能利用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

13 Wilman D, Gao Y, Altimimi M A K. Differences between related grasses, times of year and plant parts in digestibility and chemical composition[J]. Journal of Agricultural Science,1996,127(3):311~318.

14 Collins M. Wetting and maturity effects on the yield and quality of the legume hay[J]. Agronomy Journal,1983,75(3):523~527.

15 Mujumdar A S. Drying technology in agriculture and food sciences[M]. New York:Science Publishers, 2000:191~211.

16 Shahab Sokhansank, Patil F T. Kinetics of dehydration of green alfalfa[J]. Drying Technology,1996,14(5):1197~1234.

17 Llovera J, Ferran J. Harvest management effects on alfalfa production and quality in mediterranean areas[J]. Grass and Forage Science,1998,53(1):88~92.