

储存方式对生物质燃料玉米秸秆储存特性的影响

田宜水^{1,2}, 徐亚云^{1,2,3}, 侯书林³, 赵立欣^{1,2}, 姚宗路^{1,2}, 孟海波^{1,2}

(1. 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125; 2. 农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了解不同储存方式对农作物秸秆理化特性变化规律的影响, 该文针对整株、打捆、粉碎 3 种预处理方式、且分别储存在露天、覆盖、密封条件下的秸秆进行为期 5 个月的试验研究。结果表明, 粉碎秸秆的全水分、灰分较高, 分别比整株与打捆秸秆高出约 3.46%、3.83% 与 5.95%、4.62%; 但挥发分较整株、打捆秸秆分别低 5.81%、4.47%; 密封储存全水分、灰分较露天、覆盖储存高, 挥发分较露天、覆盖储存低。秸秆储存期间, 温度平均值变化不明显, 极差仅在 3.24~3.71℃ 之间, 温度最高值可达 50℃ 左右, 故应保持良好的通风。发热量与全水分呈负相关变化, 与整株和打捆秸秆相比, 粉碎秸秆发热量下降约 1 000 kJ/kg 左右。秸秆长期储存时, 应优先选择整株或打捆秸秆, 露天和覆盖储存则需要进一步研究。

关键词: 秸秆; 储存; 物理特性; 化学特性; 变化规律

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.034

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0223-07

田宜水, 徐亚云, 侯书林, 等. 储存方式对生物质燃料玉米秸秆储存特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 223—229.

Tian Yishui, Xu Yayun, Hou Shulin, et al. Effect of storage methods on properties of corn straw after storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 223—229. (in Chinese with English abstract)

0 引言

农作物秸秆是一种具有多用途的可再生生物资源, 每吨干物质秸秆的热值相当于 0.5 t 标准煤, 其 S 含量却远低于煤, 是一种清洁、可再生能源, 具有广阔的发展前景。根据统计, 2013 年全国秸秆理论可收集资源量为 8.3 亿 t, 综合利用率达 77.1%, 尚有 1.9 亿 t 未得到有效利用^[1-5]。

由于农业生产间断性与工业连续性存在一定的矛盾, 如何安全储存秸秆是其规模化利用的关键问题。刘建辉等^[3]对水稻、小麦、玉米、油菜和棉花 5 种秸秆在遮雨通风条件下试验分析, 得出其性能参数的变化规律。谢祖琪等^[4]对小麦秸秆进行储存研究, 结果表明, 储存前后的芯部温度均在安全范围内, 绝干热值无明显变化。张中波等^[5]对玉米和木质颗粒成型燃料在露天、半封闭、袋装条件下试验研究, 得出了颗粒燃料全水分、颗粒密度和机械耐久性等理化特性的长期储存数据。William A Smith 等^[6]对玉米秸秆和高粱进行全水分和干物质损失的测试分析, 得出合适的堆垛形状、方向和储存方式能够有效保持原料水分和干物质的结论。Kevin L Kenney 等^[7]对生物质原料的灰分、碳水化合物、水分等进行分析讨

论, 为提高原料质量、减少可变性提供了依据和方法。上述研究虽然对秸秆的储存和理化特性进行了初步研究, 但是对玉米秸秆在不同预处理、不同储存方式的研究较少, 缺少秸秆安全储存的试验数据。

本文通过采取 3 种不同的储存方式(露天、覆盖、密封), 针对整株、打捆、粉碎等预处理方式的玉米秸秆进行长期储存试验, 每月中旬取样并测量全水分、热值、灰分等理化特性, 分析各指标的变化规律, 以及不同预处理和储存方式对秸秆自身特性的影响, 以期对秸秆的安全储存提供理论依据和基础数据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

选取山东省肥城市 2013 年秋季所产玉米秸秆。

1.2 试验设备

本试验仪器主要包括: KZR70A 型温度记录仪和 Pt100 温度传感器(北京昆仑中大工控技术发展有限公司), 测试精度为±0.2%F.S; RT-34 静音碾磨式粉碎机(北京环亚天元机械技术有限公司); XL-1 箱型高温炉(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司); 101-3A 电热鼓风干燥箱(鹤壁市华维科力煤质仪器有限公司); ZDHW-5 微机全自动量热仪(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验时间

中国华北平原地区, 玉米秸秆普遍 11 月份开始收集, 然后进行储存, 次年 5、6 月份小麦秸秆可收集、储存并

收稿日期: 2014-12-08 修订日期: 2015-04-10

基金项目: “十二五”国家科技计划课题(2012BAD30B0202)

作者简介: 田宜水, 男, 研究员, 主要从事生物质能、秸秆综合利用、农业循环经济等技术和政策的研究。北京 农业部规划设计研究院, 100125。

Email: yishuit@yahoo.com

利用。玉米秸秆收集后,初始全水分含量很高,需一段时间风干处理,因此试验时间为2014年1月份至5月份。

1.3.2 存储方式的选择

试验地点为山东省肥城市王庄镇,试验环境为室外。

把所选试验原料分为整株、打捆、粉碎3种形式,分别在露天(自然环境下直接储存)、覆盖(防水布遮住顶部)、密封(先塑料包裹,再用防水布全部遮盖)条件下储存,储存地面为未经过处理的土地。

整株秸秆:选用3组约1t经风干后的整株玉米秸秆进行堆垛,长、宽、高尺寸约为:2400mm×2300mm×2160mm。

打捆秸秆:选择3组约2.5t经HB3060型打捆机处理的玉米秸秆捆进行堆垛,长、宽、高尺寸约为:2400mm×2300mm×2160mm。选取600mm×460mm×360mm的秸秆捆120捆,每层20捆,共堆积6层。

粉碎秸秆:选择3组约1.5t经9ZR-14型铡揉机处理的粉碎玉米秸秆进行堆垛,半径、高度约为:1500mm×2000mm。

1.3.3 试验方法

全水分:整株和粉碎秸秆,由上而下分3层取样;打捆秸秆则分4层取样。样品制备完成后,按照NY/T 1881.2-2010进行测试。

工业分析、发热量:取样后,使用密封袋保存并进行编号,按照《NY/T 1881.1-2010~1881.8-2010 生物质固体成型燃料试验方法》制样和测试。

温度:整株秸秆分3层,每层安装3个Pt100温度传感器;打捆秸秆分4层,每层安装3个传感器;粉碎秸秆分3层,顶层安装一个传感器,中间和底层分别安装3个传感器。具体安装位置见图1。

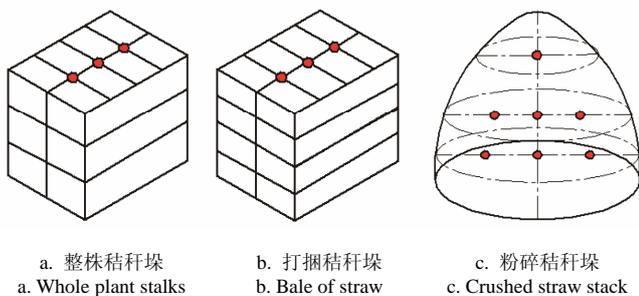


图1 温度传感器安装示意图
注:图中圆点为每层传感器分布图,且a图3层,b图4层,c图3层。
Note: Dot of figure is sensor distribution map, and 3 layers for a figure, 4 layers for b figure, 3 layers for c figure.

图1 温度传感器安装示意图

Fig.1 Installation diagram of temperature sensor

2 试验结果与分析

山东省肥城市属暖温带湿润季风气候,冬季寒冷少雪,春季较干多风,全年平均气温13℃,年平均降水量700~800mm,风向一般为东南风。为分析环境温度和湿度对试验的影响,从2014年1月开始每8h记录1次空气温湿度,每天记录3组数据,储存期间月环境平均温湿度数值见图2,其中1月7日、31日小雨;2月5日、16日、17日、26日雨夹雪;3月11日、18日号小雨;4月15日、18日、20日小雨,25日中雨;5月10

日中大雨。环境温度总体呈上升趋势,仅2月份因降雪平均温度最低为0,5月份上升到20℃;环境湿度与降雨有关,一般在45%~65%之间,3月份进入春季,因季节变化平均湿度最低达46%。

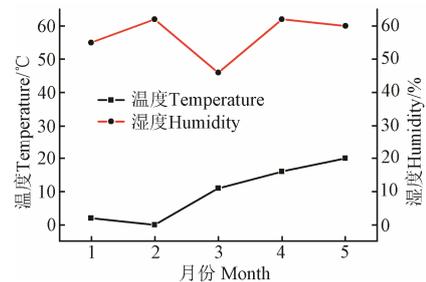


图2 环境温湿度变化

Fig.2 Ambient temperature and humidity changes

2.1 表观观察

秸秆长期储存时,表面颜色均逐渐变深,说明秸秆表层可能发生氧化,整株和粉碎秸秆料堆逐渐变矮,有坍塌趋势。整株和打捆状态下,露天、覆盖储存的秸秆相对干燥,密封则较潮湿;粉碎秸秆露天储存10d左右时,出现白烟,表明秸秆此时自身生理作用强,产生的水蒸气遇冷空气后冷凝。粉碎状态下,密封秸秆外部最潮湿,腐烂现象严重。

2.2 全水分变化分析

图3为3种预处理(整株、打捆、粉碎)秸秆分别以露天、覆盖、密封形式储存时整垛全水分的变化规律。从整体来看,存储方式比预处理对全水分影响更为显著。同一预处理方式时,密封储存时玉米秸秆全水分变动幅度最大,以整株秸秆为例,密封条件下储存,玉米秸秆全水分标准差达9.024%,分别比露天和覆盖条件高4.7%和2%;同一储存方式时,粉碎秸秆变化最大,以露天储存为例,储存期间,粉碎秸秆全水分标准差达6.839%,比整株和打捆秸秆高2.5%和1.6%,具体统计数据见表1。

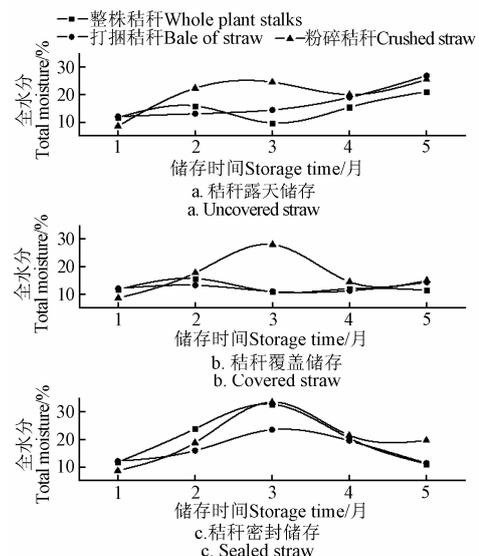


图3 秸秆在不同状态和储存条件下的全水分变化
Fig.3 Full water changes of straw under different storage conditions

表 1 全水分统计分析表
Table 1 Statistical analysis of whole water

秸秆状态 Straw status	储存形式 Storage form	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average value	标准差 Standard difference
整株 Whole plant	露天 Open air	21.12	9.74	14.796	4.379
	覆盖 Covered	15.71	10.89	12.36	1.918
	密封 Sealed	32.76	11.08	19.974	9.024
打捆 Strapping	露天 Open air	23.49	11.36	16.47	5.104
	覆盖 Covered	14.37	11.04	12.404	1.409
	密封 Sealed	26.95	12.08	17.132	6.101
粉碎 Smashing	露天 Open air	25.58	8.62	20.25	6.839
	覆盖 Covered	28.06	8.62	16.824	7.121
	密封 Sealed	33.52	8.62	20.406	8.878

农作物秸秆成型过程中，玉米秸秆的最佳成型水分为 15%^[8]。由表 1 知：整株状态下，秸秆露天储存时，全水分平均值为 14.5%，临近最佳成型水分，其次为露天和密封储存。打捆状态下，同上，露天储存时秸秆最利于成型，密封储存因全水分含量较高，不便作为成型燃料使用。粉碎状态下，覆盖秸秆全水分含量为 16.8%，较易于成型，而露天和密封储存全水分含量均高出 5% 左右，不利于成型。因此，玉米秸秆作为成型燃料使用时，应该选择整株或者打捆状态，并在露天条件下储存。

在露天条件下，玉米秸秆料堆（除底部外）与外部环境完全接触，降雨（雪）将直接落到料堆顶部并渗透至料堆中，受环境影响最大。整体上，整株、打捆、粉碎秸秆全水分随温度、湿度上升而呈上升趋势。整株和打捆秸秆全水分分别从初始的 11.73% 和 12.08%，增加至 5 月份最高点，为 21.12% 和 26.95%；3 月份时整株秸秆全水分最低，为 9.74%，原因在于 3 月份空气较为干燥，相对湿度为 46%；打捆秸秆变化则不明显，说明打捆秸秆较为密实，水分扩散速率较慢。粉碎秸秆全水分整体偏高，最高达 30.86%，与其他相比明显存在滞后性，原因在于秸秆粉碎后，比表面积增加，且破坏了其表皮覆盖的蜡质层结构，吸水性较好。

在覆盖条件下，玉米秸秆料堆（除顶部、底部外）与外部环境完全接触，受环境影响较大。另外，受防雨布遮挡，降雨（雪）无法渗透，可能形成局部积水现象。整体上，整株和打捆秸秆全水分基本相同，与环境湿度变化一致，3 月份时最低，分别为 10.89% 和 11.04%，4 月份比 2 月份全水分含量分别降低了 3.7% 和 2%，可能因为达到平衡含水率后，温度越高，分子活性越大，全水分降低。粉碎秸秆全水分最高，3 月份达到峰值 28.06%，原因可能是秸秆表层遭到破坏后，2 月末吸收大量水分，散失较慢。

在密封条件下，玉米秸秆料堆几乎与外界隔离，受环境影响最小，另外，受密封布遮挡，降雨（雪）无法渗透，会导致秸秆自身产生的水分无法顺利排出。整体上，三者处理方式秸秆全水分变化一致，分别从初始的 11.73%、12.08% 和 8.62%，增加至 3 月份最高点，即 32.76%、23.49% 和 33.52%，最后下降到 5 月份的 11.08%、11.36% 和 19.62%。变化趋势与其他储存方式相比，存在

明显的滞后性，其中，整株和粉碎秸秆因密度小，全水分较高，打捆秸秆则偏低。

由以上分析可知，粉碎秸秆全水分含量高且变化幅度较大，本文以粉碎秸秆为例，分析每层全水分的变化规律，如图 4。

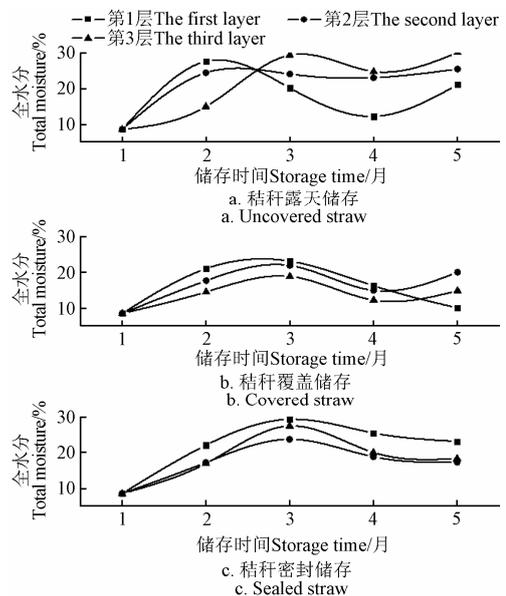


图 4 粉碎秸秆全水分梯度变化

Fig.4 Total moisture gradient of crushed stalks

露天储存时，第 1 层受环境影响最明显，4 月份时全水分最低为 12.28%。第 2 层受环境影响较小，全水分处于第 1、3 层之间，从初始含水率 8.62% 上升至 2 月份的 24.5% 后，几乎不再发生变化。第 3 层全水分从初始 8.62% 升高到 3 月份的 29.44% 后，一直保持在 25% 以上，原因可能是受到地表温度、水分的影响。覆盖储存时，秸秆堆只有侧面接触环境，第 1 层 3 月份后全水分持续降低，可能受覆盖影响，外界降水无法渗入。第 2、3 层全水分变化与环境湿度相比，略有滞后，可能因为秸秆组织受到破碎后，散失水分较慢导致。密封储存时，3 层秸秆全水分变化趋势基本一致。其中，第 1 层含量最高，因为密封后，蒸发水分，可能停留在密封布下表面。

2.3 温度变化分析

图 5 为整株、打捆、粉碎秸秆分别在露天、覆盖、密封条件下储存时的日平均温度变化情况。整体略高于

环境温度,变化规律与环境温度基本保持一致。其中,仅在第 25 天时低于环境温度,可能是因为季节变化或者全水分较低导致。说明秸秆长期储存时,温度随时间变化规律主要受外界环境影响。

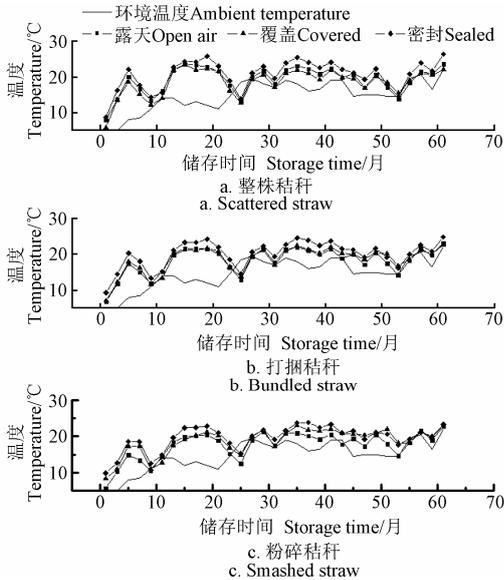


图 5 秸秆在不同状态和储存条件下的平均温度变化

Fig.5 Average temperature changes of straw under different storage methods and straw status

整株状态下,露天储存时秸秆温度变化最小,标准差为 3.498%,覆盖、密封储存秸秆略高,分别为 3.573%和 3.646%。其中,密封秸秆温度平均值最高,且在测试最后 1 天达到峰值,为 26.68℃,高出环境温度 5℃左右,可能因为气候变暖,太阳辐射增强,自身理化作用释放能量。打捆状态下,玉米秸秆以露天、覆盖、密封形式储存时,温度变化最相近,标准差分别为 3.536%、3.364%和 3.337%。同整株状态,密封秸秆仍在测试最后 1 天日平均温度最高,达 24.80℃,略高于环境温度,略低于上述整株状态。粉碎状态下,露天储存秸秆温度变化最大,标准差为 3.71%,覆盖和密封储存较小,标准差分别为 3.43%、3.24%。相比整株和打捆状态,密封秸秆温度平均值仍为 3 种储存方式中最高,但在第 20 天达到最高为 23.88℃。

为研究 24 h 内秸秆垛芯部温度变化情况,选择整株秸秆进行分析讨论(图 6),试验当天环境温度在 16~30℃之间,由于太阳直射关系,环境温度一般在早上 8:00 左右上升,晚上 8:00 左右下降。3 种储存方式的全水分平均值分别为 13.12%、11.46%和 11.08%。

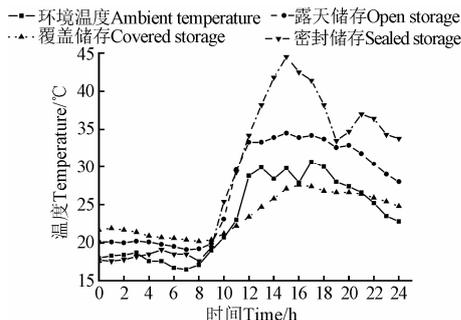


图 6 整株秸秆垛温度 24 h 内的变化

Fig.6 Temperature changes of whole stalks during 24 h

露天储存时,秸秆料堆与外部环境完全接触,受环境温度影响最大。0~8 h 几乎维持平衡,温度变化曲线在露天和密封储存曲线之间,8~12 h 从 19.9℃增加至 34.5℃后无明显变化,然后在 20 h 左右下降到 28℃。可以知道,整体变化趋势与环境温度变化相同,只是数值略有升高,原因可能是经太阳直射后,外界热量传入秸秆垛。

覆盖储存时,由于遮雨布遮盖,受环境温度影响较小。与另外 2 种方式比较,温度曲线在 1~8 h 最高,8~15 h 从 20.4℃缓慢增加至 27.6℃后无明显变化,最后在 20 h 左右下降到 24.8℃。试验期间,温度变化最小,且最接近环境温度。原因可能是覆盖秸秆密度大、受太阳直射影响小,内、外部温度达到平衡。

密封储存时,由于密封布影响,温度变化与环境温度变化相差最大。与另外 2 种方式比较,温度曲线在第 1~8 小时最低,第 8~14 小时从 18.5℃迅速升高至 44.5℃,第 14~18 小时下降至 33.5℃后达到动态平衡,最高温度相比外界环境升高了 17℃。可能因为密封条件下分子活性大、微生物活性强,放热多。

可以知道,露天和覆盖条件下储存的秸秆,温度波动较小;密封条件下储存的秸秆,峰值最大达 45℃左右,且变化迅速,因此储存时应该注意通风散热,避免自燃。

2.4 发热量变化分析

发热量是生物质原料资源化利用的重要评价指标之一^[5-9]。由表 2 可见,整体来看,玉米秸秆收到基低位发热量随时间呈下降趋势,2 月份下降较为明显,且与全水分呈负相关变化,可能因为秸秆全水分较大导致。以整株秸秆为例,分别露天、覆盖、密封储存时,1~5 月份 Qar 降低了 1 512、1 608、1 612 kJ/kg;其中,密封储存秸秆发热量平均值最低,仅 11 547 kJ/kg,分别较露天、覆盖储存下降 661、642 kJ/kg。

如果扣除水分影响,以干燥基为基准进行分析,整株状态下,露天储存秸秆发热量在 12 109~14 333 kJ/kg 之间,1~2 月份下降趋势明显,降低了 686 kJ/kg,可能因为全水分较大,受软腐菌、霉菌等侵入,导致腐败,有机物被微生物分解为 CO₂ 和 H₂O;3~4 月份则略有提高,可能因为季节、气候变化,全水分含量降低,秸秆中纤维素、木质素等消耗减少导致;覆盖储存秸秆发热量在 11 619~14 252 kJ/kg 之间,其中 1~2 月份比整株储存略低,3~5 月份略高 300 kJ/kg 左右;密封储存秸秆发热量明显降低,发热量在 10 003~13 779 kJ/kg 之间,原因在于缺乏雨水冲刷^[6-7]。

打捆状态下,发热量总体比整株状态略高,在 10 076~15 060 kJ/kg 之间,分别以露天、覆盖、密封方式储存时,变化规律与整株秸秆相似,可能因为打捆预处理后,秸秆密度大且温度略低,微生物活性较低所致。

粉碎状态下,发热量最低,在 9 521~12 904 kJ/kg 之间,原因可能是秸秆粉碎后,表皮及蜡质层受到破坏,更易受软腐菌、霉菌等侵入。

3 种状态下，粉碎秸秆发热量最低不便使用，打捆秸秆略高可优先选择；3 种储存条件下，密封储存发热量最

低，不适于燃烧利用，应合理根据成本等影响因素选择露天或覆盖储存方式。

表 2 玉米秸秆发热量比较分析
Table 2 Comparative analysis of calorific value for corn straw

秸秆状态 Straw status	储存形式 Storage form	发热量 Low calorific value / (kJ·kg ⁻¹)									
		干燥基 Q _d					收到基 Q _{ar}				
		1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
整株 Whole plant	露天 Open air	14333	12109	13647	13608	12809	13386	10591	12621	12571	11874
	覆盖 Covered	14252	11619	13741	13989	13511	13336	10317	12710	12856	11728
	密封 Sealed	13779	10003	13713	12989	12253	13076	8476	12683	12037	11464
打捆 Strapping	露天 Open air	14981	11781	14311	13928	12192	12715	10644	12873	12461	11119
	覆盖 Covered	15060	12473	15020	14948	14605	14818	10952	14371	13918	13586
	密封 Sealed	13989	10076	14077	12643	12085	12871	8933	12642	11003	10246
粉碎 Smashing	露天 Open air	12904	9521	11831	11946	11173	12099	7921	10770	10481	10107
	覆盖 Covered	12896	10452	13914	11378	10636	12091	8959	12892	11859	9664
	密封 Sealed	12877	9995	11389	10243	10414	12073	8522	10329	11440	8330

2.5 工业分析

工业分析包括一般样品水分、灰分、挥发分和固定碳，其中，灰分和挥发分对原料利用影响较大，故本试验主要分析灰分和挥发分的变化规律，试验数据以干燥基为基准。

2.5.1 灰分

表 3 数据显示：随秸秆储存时间延长，灰分含量先

迅速上升再略微降低，3—4 月份分别降低了 3.1%、1.5%、6.1%，可能因为降雨增多，冲刷掉一部分灰分，符合本文对发热量变化的分析。3 种秸秆状态下，整株和打捆秸秆灰分含量较低且随时间变化小，粉碎秸秆灰分含量高，最高达 24%，可能是在秸秆粉碎处理过程中，混入其他杂质所致。

表 3 秸秆灰分变化（干燥基）
Table 3 Ash changes of straw (dry base)

秸秆状态 Straw status	储存形式 Storage form	灰分 Ash / %							
		1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	极差 Poor
整株 Whole plant	露天 Open air	9.55	14.5	14.62	11.5	11.94	12.42	2.15	5.07
	覆盖 Covered	9.55	15.39	10.72	9.18	10.48	10.63	3.04	8.39
	密封 Sealed	9.55	16.25	15.5	9.47	11.81	12.52	3.22	6.78
打捆 Strapping	露天 Open air	11.98	13.02	14.18	13.24	13.27	13.94	2.43	6.2
	覆盖 Covered	11.98	12.24	10.91	10.95	11.85	12.39	1.49	3.96
	密封 Sealed	11.98	11.62	11.45	11.8	13.31	13.23	2.55	6.14
粉碎 Smashing	露天 Open air	12.15	16.17	22.44	18.22	21.51	18.1	4.12	10.29
	覆盖 Covered	12.15	16.74	24.02	16.65	19.45	17.8	4.35	11.87
	密封 Sealed	12.15	19.09	19.76	17.91	19.67	17.52	3.09	7.61

2.5.2 挥发分

表 4 数据显示：秸秆 1—2 月份下降趋势明显，如整株秸秆分别降低了 9.15%、7.4%、8.4%，3 个月后变化较

小，原因可能受微生物分解作用影响。3 种秸秆状态下，整株和打捆秸秆挥发分含量相近且较高，达 72% 左右，粉碎秸秆明显降低，数值仅 68% 左右。

表 4 挥发分变化（干燥基）
Table 4 Volatile changes of straw (dry base)

秸秆状态 Straw status	储存形式 Storage form	挥发分 Volatile matter / %							
		1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	极差 Poor
整株 Whole plant	露天 Open air	78	68.88	70.72	72.67	72.35	72.52	3.41	9.12
	覆盖 Covered	78	70.59	74.37	74.59	77.2	74.95	2.91	7.41
	密封 Sealed	78	69.68	70.84	73.68	74.29	73.3	3.25	8.32
打捆 Strapping	露天 Open air	76	70.73	67.42	71.1	71.06	71.26	3.06	8.58
	覆盖 Covered	76	72.37	70.78	75.29	72.87	73.46	2.15	5.22
	密封 Sealed	76	71.28	67.55	72.64	72.82	72.06	3.06	8.45
粉碎 Smashing	露天 Open air	73.99	69.87	66.37	62.13	67.99	68.07	4.37	11.86
	覆盖 Covered	73.99	68.21	62.49	69.43	66.44	68.11	4.20	11.5
	密封 Sealed	73.99	65.7	64.67	65.89	65.63	67.18	3.84	9.32

3 结 论

1) 秸秆储存过程中, 储存条件比预处理方式对全水分影响大。粉碎秸秆平均全水分含量最高达 19.16%, 整株和打捆秸秆较低, 分别为 15.71% 和 15.34%。由于环境湿度和自身理化作用影响, 露天和密封储存时的全水分含量较覆盖储存高。同一秸秆垛比较时, 每层全水分含量变化规律相同, 但数值有明显区别, 可能因为预处理时秸秆组织发生破坏, 吸水或散失水的能力不同。

2) 秸秆长期储存时, 平均温度普遍比环境温度高。秸秆温度变化与外界环境、全水分含量密切相关, 3 种不同预处理方式的秸秆, 日平均温度变化不明显, 极差仅在 3.24~3.71℃ 之间。整株秸秆在露天、覆盖、密封条件下储存时温度最高值分别为 40.8、35.4、44.7℃, 打捆秸秆上述数据为 32.7、30.3、35.8℃, 粉碎秸秆为 40.5、39.3、43.7℃, 打捆秸秆易于安全储存, 整株、粉碎秸秆储存量多时, 应该保持环境通风良好。

3) 以干燥基为基准时, 整株和打捆秸秆发热量相近, 平均值在 14 000 kJ/kg 左右, 粉碎秸秆较低在 13 000 kJ/kg 左右, 且密封储存较露天和覆盖储存低, 长期储存时, 受微生物和雨水冲刷影响。以收到基为基准时, 发热量明显降低, 发热量与全水分呈负相关变化。整体来说, 秸秆灰分随时间升高, 1~5 月份增加了 3% 左右; 挥发分降低, 1~5 月份降低了约 6%, 其中, 粉碎秸秆灰分含量最高, 挥发分最低, 且在不同储存条件下无明显变化。

4) 从秸秆高效利用角度考虑: 粉碎秸秆因发热量和挥发分低、含水率和灰分高, 不利于能源利用, 打捆秸秆比整株秸秆易储存, 但成本较高; 3 种储存条件下, 密封储存不建议使用, 露天和覆盖储存因各参数指标变化不一致, 需要进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291—296. Cui Ming, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 291—296. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276—282. Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 276—282. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘建辉, 谢祖琪, 姚金霞, 等. 农作物秸秆在遮雨通风条件下的储存研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(5): 1889—1894. Liu Jianhui, Xie Zuqi, Yao Jinxia, et al. Study on Crop Straw/Stalk bundles stored in rain-awning natural environment[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(5): 1889—1894. (in Chinese with English abstract)
- [4] 谢祖琪, 余满江, 虞洪章, 等. 小麦秸秆储存机理研究[J]. 西南大学学报, 2011, 33(7): 130—136. Xie Zuqi, Yu Manjiang, Tuo Hongzhang, et al. Study on storage mechanism of wheat straw[J]. Journal of Southwest University, 2011, 33(7): 130—136. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张中波, 田宜水, 侯书林, 等. 生物质颗粒燃料的储藏理化特性变化规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 223—229. Zhang Zhongbo, Tian Yishui, Hou Shulin, et al. Variation of physical and chemical characteristics of biomass pellet fuels during storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 223—229. (in Chinese with English abstract)
- [6] William A Smith, Ian J Bonner, Kevin L Kenney, et al. Practical considerations of moisture in baled biomass feedstock[J]. Biofuels, 2013, 4(1): 95—110.
- [7] Kevin L Kenney, William A Smith, Garold L Gresham, et al. Understanding biomass feedstock variability[J]. Biofuels, 2013, 4(1): 111—127.
- [8] 霍丽丽, 田宜水, 赵立欣, 等. 生物质原料持续供应条件下理化特性研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 107—113. Huo Lili, Tian Yishui, Zhao Lixin, et al. Physicochemical properties of biomass resources for sustainable supply[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 107—113. (in Chinese with English abstract)
- [9] 霍丽丽, 孟海波, 田宜水, 等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 189—195. Huo Lili, Meng Haibo, Tian Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 189—195. (in Chinese with English abstract)
- [10] 田宜水, 姚宗路, 欧阳双平, 等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 124—145. Tian Yishui, Yao Zonglu, Ouyang Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 124—145. (in Chinese with English abstract)
- [11] 樊峰鸣, 张百良, 李保谦, 等. 大粒径生物质成型燃料物理特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 398—402. Fan Fengming, Zhang Bailiang, Li Baoqian, et al. Physical properties of briquettes from coarse biomass[J]. Journal of Agro-environment Science, 2005, 24(2): 398—402. (in Chinese with English abstract)
- [12] 田宜水, 孟海波, 孙丽英, 等. 秸秆能源化技术与工程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 129—133.
- [13] 熊昌国, 谢祖琪, 易文裕, 等. 农作物秸秆能源利用基本性能的研究[J]. 西南农业学报, 2010(5): 1725—1732. Xiong Changguo, Xie Zuqi, Yi Wenyu, et al. Study on basic characteristics of crop straw/stalk used as biomass energy resources[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2010(5): 1725—1732. (in Chinese with English abstract)
- [14] Yuan J S, Wang X, Stewart Jr NS. Biomass feedstock: diversity as a solution[J]. Biofuels, 2001, 2(5): 491—493.
- [15] 周晶, 吴海涛, 丁士军, 等. 秸秆资源收获季节性及其能源供应持续性分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 177—183. Zhou Jing, Wu Haitao, Ding Shijun, et al. Analysis of seasonal variation in crop residue harvest and sustainability of its energy supply[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 177—183. (in Chinese with English abstract)
- [16] 霍丽丽, 田宜水, 赵立欣, 等. 农作物秸秆原料物理特性及测试方法研究[J]. 可再生能源, 2011, 29(6): 86—92. Huo Lili, Tian Yishui, Zhao Lixin, et al. Research on physical property of crop straw and test methods[J]. Renewable Energy, 2011, 29(6): 86—92. (in Chinese with English abstract)

- [17] 周捍东, 徐长妍, 丁沪闽, 等. 木材散碎物料基本堆积特性的研究[J]. 木材加工机械, 2002, 13(6): 7—17.
Zhou Handong, Xu Changyan, Ding Humin, et al. Studies on the basic characteristics of wooden bulk materials[J]. Wood Processing Machinery, 2002, 13(6): 7—17. (in Chinese with English abstract)
- [18] Athanasios A Rentizelas, Athanasios J Tolis, Ilias P Tatsiopoulos, et al. The Storage problem and the multi-biomass supply chain[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(4).
- [19] 艾玉春, 王伟, 李鹏霞, 等. 甘蔗在贮藏期间营养与生理变化研究[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(2): 37—42.
Ai Yuchun, Wang Wei, Li Pengxia, et al. Studies on changes for nutrition and physiology about two breeds of sweet potato in preservation. Journal of Food Science and Technology, 2013, 31(2): 37—42. (in Chinese with English abstract)
- [20] 虞洪章, 刘建辉, 谢祖琪, 等. 秸秆成型加工技术的试验研究[J]. 西南大学学报, 2009(11): 133—139.
Tuo Hongzhang, Liu Jianhui, Xie Zuqi, et al. Experimental study of processing technology of compressed biomass blocks[J]. Journal of Southwest University, 2009(11): 133—139. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵丽华, 莫放, 余汝华, 等. 贮存时间对玉米秸秆营养物质损失的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 4—7.
Zhao Lihua, Mo Fang, Yu Ruhua, et al. The influence of the storage time on the nutrient content and the DOM of corn stalk[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(2): 4—7. (in Chinese with English abstract)
- [22] Sokhansanj S, Turhollow A, Cushman J, et al. Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy[J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 23(5): 347—355.
- [23] Ragland K W, Aerts D J. Properties of wood for combustion analysis[J]. Bioresource Technology, 1991, 37(2): 161—168.

Effect of storage methods on properties of corn straw after storage

Tian Yishui^{1,2}, Xu Yayun^{1,2,3}, Hou Shulin³, Zhao Lixin^{1,2}, Yao Zonglu^{1,2}, Meng Haibo^{1,2}

(1. Institute of Rural Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;

2. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residues, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China;

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To understand the effects of different storage conditions on physicochemical properties of crop straw, this paper has studied 3 kinds of straw pretreated methods which specifically are the whole plant, baling and crushing, together with 3 storage methods of pretreated straw i.e. stored in the open air, under the covering condition and under the sealed condition with tarpaulin for a period of 5 months. The results show that average of total moisture content of crushed stalks reaches 19.16%, which is respectively 15.71% and 15.34% higher than whole plant and baling straw. Due to the influence of environmental humidity and their own physical and chemical effects, total moisture contents of straw stored in the open air and under the sealed condition are higher than that stored under the covering condition; for the same pile of straw, total moisture content in each layer has the same change, but there are significant differences between the values. Straw temperature changes with the external environment; all are closely related to moisture content, average daily temperature does not change significantly, and the range is only between 3.24 and 3.71°C. The maximum storage temperatures are 40.8, 35.4 and 44.7°C, respectively, when whole plant stalks are stored in the open air, under the covering and sealed condition; the above data for baling straw are 32.7, 30.3 and 35.8°C, respectively; and crushed stalks are 40.5, 39.3 and 43.7°C, respectively. So, the bale of straw is easy safe storage, and when the whole plant and crushing straw are stored for a long time, it should keep the environment ventilated. The calorific value is negatively correlated with total moisture content, the calorific value based on dry basis is higher than that based on receive basis. When the group is on dry basis, the calorific values of whole plant and baling straw are similar, with the average reaching 14 000 kJ/kg, and the calorific value of crushed straw is lower, around 13 000 kJ/kg. When the group is on receive basis, the calorific value presents downward trend over time, showing more obvious decline in February and a negative correlation with the total moisture change. Taking the whole plant stalks as the example, the calorific value is reduced by 1512, 1608 and 1612 kJ/kg respectively from January to May when straw is stored in open air, under the covering and sealed condition; the average calorific value of sealed storage is the lowest, only 11 547 kJ/kg. On the whole, the total moisture and volatile of crushed straw are higher than whole plant and baling straw, and the ash content is lower than them; the total moisture and volatile of sealed storage are higher than stored in the open air and covered storage, and the ash content is lower than them. Therefore, crushed straw is not conducive to energy use, and bale of straw is easier storage than the whole plant, but its cost is higher; sealed storage is not recommended, and because the parameter indices change inconsistently when straw is stored in the open air and under the covering condition, the latter two methods require further study.

Key words: straw; storage; physical properties; chemical properties; variation