

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20170237

## 汽爆及发酵处理对藜麦秸秆挥发性风味物质的影响

张慧玲, 王志伟, 周中凯

(天津科技大学新农村发展研究院, 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

**摘要:** 藜麦秸秆是良好的饲用原料,为了提高其消化利用率,本文依次对该秸秆进行低强度蒸汽爆破(0.5、1.0、1.5 MPa, 5 min)及生物厌氧发酵(25 °C, 7 d)处理,并采用顶空固相微萃取与气质联用法分析汽爆及发酵前后样品中挥发性风味成分的变化.结果表明,藜麦秸秆的挥发性风味成分主要为醇类、酯类、醛类、芳香类等,其中1.0 MPa汽爆处理产生的风味物质最多,共计93种,并且1.0 MPa汽爆秸秆发酵后芳香类、醇类、酯类风味物质比例显著提高.总之,1.0 MPa汽爆及发酵的复合处理可以改善藜麦秸秆风味及适口性.

**关键词:** 藜麦秸秆; 风味物质; 蒸汽爆破; 生物发酵; 固相微萃取; 气质联用

中图分类号: S548 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2019)01-0024-08

## Effects of Steam Explosion and Fermentation on Volatile Flavor Compounds of Quinoa Straw

ZHANG Huiling, WANG Zhiwei, ZHOU Zhongkai

(Institute for New Rural Development, College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Quinoa straw is a good feed material. In this research, firstly the straw was treated by low-intensity steam explosion (0.5, 1.0, 1.5 MPa, 5 min) and bio-fermentation, and the variety of the volatile flavor components in samples before and after steam explosion and fermentation was analyzed using HS-SPME GC-MS. The results indicated that, the main volatile flavor components in the straw were alcohols, esters, aldehydes, aromatics and some other compounds. They also showed that the steaming treatment at 1.0 MPa pressure resulted in most aromatic substances in the straw with a total of 93 types, and the alcoholic flavor of the product after the fermentation of the raw material was richer. In short, after the combination process of 1.0 MPa steam explosion and fermentation, the palatability of quinoa straw can be improved greatly, and the straw can become good animal feed.

**Key words:** quinoa straw; volatile components; steam explosion; biological fermentation; solid phase microextraction; gas chromatography-mass spectrometry

藜麦是一种原产于南美洲安第斯山区的抗逆植物,是一种营养价值极高的“类全谷物”<sup>[1]</sup>,适宜人类食用的全营养食品<sup>[2]</sup>,在西部省份广泛种植.我国山西静乐县成功地引种藜麦,2012年,静乐县藜麦种植面积达到86公顷,总产量23.4万kg,种植面积位列非原产地国家第二位,仅次于美国<sup>[3]</sup>.相比于普通农作物秸秆,其含有较高的粗蛋白(8%)、粗脂肪含量(1.5%~2%),能够作为优良的饲草料资源,但并未得

到充分利用.目前,以食草牲畜为主的“节粮型”畜牧业高速发展,且秸秆类粗饲料的开发利用越来越受到人们关注,由于此类粗饲料一般存在体积大、适口性差等缺点,动物对其消化吸收率较低,因此对秸秆作一定的前处理很有必要.

通过借鉴蒸汽爆破(以下简称汽爆)、微贮对玉米秸秆加工的文献报道,本课题组前期已系统研究了汽爆、发酵对藜麦秸秆理化指标的影响<sup>[4]</sup>,发现汽爆及

收稿日期: 2017-08-28; 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家级星火计划资助项目(2015GA610003); 天津科技大学新农村发展研究院开放基金资助项目(XNC201504)

作者简介: 张慧玲(1990—),女,河南濮阳人,硕士研究生; 通信作者: 周中凯,教授, zkzhou@tust.edu.cn

发酵加工方法显著降解了木质纤维素含量,将秸秆纤维成分有效转化为可溶物,可溶性糖含量显著增加,提高了秸秆的营养价值.从营养学角度上看,风味也是饲料感官及饲用品质的一个重要指标,为了进一步探讨汽爆、发酵对秸秆风味的影响及风味化合物的变化规律,优化工艺参数,本研究采用顶空固相微萃取法(HS-SPME)提取不同汽爆条件及发酵后秸秆饲料中的挥发性风味成分,并采用气相色谱-质谱(GC-MS)联用定性分析其成分构成.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

同一时期收割的藜麦秸秆风干,水分为10%~12%,粉碎至长度2~3 cm,保存于密闭的塑料袋. vm88 秸秆分解剂,吉林唯美生物饲料科技有限公司.

固相微萃取手动进样手柄、DVB/CA/PDMS (2 cm, 50/30  $\mu\text{m}$ ) 纤维头,美国 Supelco 公司; QP2010Ultra 型气相色谱-质谱联用仪,美国 Varian 公司; QBS-2008 型蒸汽爆破设备(汽爆容积 5 L),鹤壁正道生物能源有限公司; BSA623S 型电子分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; 高速多功能粉碎机,上海缘沃工贸有限公司; 呼吸膜发酵饲料专用袋,浙江苍南县金坝包装工艺品厂.

### 1.2 方法

#### 1.2.1 藜麦秸秆汽爆处理

将切碎的藜麦秸秆加水至含水率为50%<sup>[5]</sup>,分别称取200 g 样品加入到汽爆反应器中,依次在0.5、1.0、1.5 MPa 压力汽爆,保压时间均为5 min. 处理完成后,快速打开反应器底部的球阀将物料取出,自然晒干、粉碎.

#### 1.2.2 藜麦秸秆微生物发酵处理

营养液制备:根据秸秆分解剂制作营养液的方法按照1:100的比例缩小.取2 g 分解剂与500 g 玉米粉装进呼吸膜发酵饲料专用袋中,并加入1500 g 温水搅拌均匀,封口,密封发酵5 d,出现酒香味即可.

生物发酵:分别取3种压力汽爆处理后的秸秆粉及原秸秆粉100 g,加入10%营养液(即10 g),装入发酵袋中,搅拌均匀,封口并密封发酵7 d.

#### 1.2.3 顶空固相微萃取操作方法

称取1 g 样品于15 mL 气相顶空瓶中,70  $^{\circ}\text{C}$  恒温水浴30 min,将SPME 针头穿过样品瓶密封隔垫,于样品瓶顶空部分伸出固相萃取头,静置萃取30 min,

收回固相萃取头,取出萃取装置,待气相色谱仪处于准备状态后,将SPME 针头插入进样口,伸出固相萃取头,250  $^{\circ}\text{C}$  解吸15 min. 下次取样前,首先将SPME 萃取头在250  $^{\circ}\text{C}$  老化30 min<sup>[6]</sup>.

#### 1.2.4 气相色谱-质谱检测条件

色谱条件:色谱柱为VF-5 ms (30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ),固定相为聚乙二醇,载气为高纯氦气(99.999%),流量1.0 mL/min,进样口温度250  $^{\circ}\text{C}$ ,分流比5:1.初始炉温40  $^{\circ}\text{C}$  保持3 min,以4  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至150  $^{\circ}\text{C}$ ,保持1 min,再以8  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至250  $^{\circ}\text{C}$ ,保持6 min.

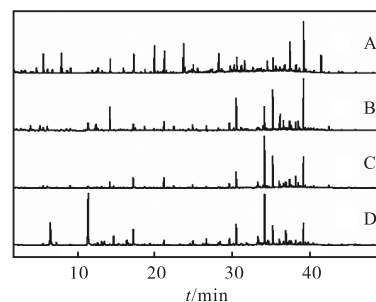
质谱条件:电子电离源,电子能量70 eV,离子源温度220  $^{\circ}\text{C}$ ,接口温度280  $^{\circ}\text{C}$ ,相对分子质量扫描范围43~500,调谐文件为标准调谐,数据采集为全扫描模式,无溶剂延迟.

对检测结果的定性分析,以计算机检索NIST11 谱库、人工解析图谱,结合相似度并参考有关文献,共同确定挥发性成分,挥发性成分相对含量采用面积归一化法.

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆挥发性成分分析

原秸秆及不同汽爆条件处理的秸秆初始时总离子流色谱图如图1所示.



A. 原样; B. 0.5 MPa 汽爆; C. 1.0 MPa 汽爆; D. 1.5 MPa 汽爆

图1 汽爆前后秸秆的挥发性风味成分GC-MS分析总离子流图

Fig. 1 GC-MS chromatograph of volatile flavor components of four kinds of straw before and after steam explosion

由图1可以看出,与原秸秆相比,汽爆处理显著地改变了秸秆挥发性风味成分.从表1的分析结果可以看出:原秸秆中鉴定出76种挥发性风味成分,包括醇类22种、酮类13种、醛类18种、酯类10种、芳香类6种、烃类3种及其他类4种.同时结果显

示,3种不同汽爆条件也会导致风味成分在数量及相对含量上存在显著性差异,其中0.5 MPa汽爆样品中鉴定出90种风味成分,包括醇类24种、酮类24种、醛类18种、酯类4种、芳香类8种、酸类1种、烃类9种及其他2种;1.0 MPa汽爆样品鉴定出93种挥发性风味物质,包括醇类21种、酮类19种、醛类21

种、酯类5种、酸类1种、芳香类14种、烃类10种及其他2种;1.5 MPa汽爆样品中鉴定出88种挥发性风味成分,包括醇类15种、醛类24种、酮类15种、芳香类14种、酯类3种、烃类13种、酸类1种及其他3种。

表1 汽爆前后秸秆主要挥发性风味物质GC-MS分析结果

Tab.1 GC-MS analysis of the major volatile substances of four kinds of straw before and after steam explosion

类别	化合物	相对含量/%			
		原样	0.5 MPa	1.0 MPa	1.5 MPa
醇类	糠醇	—	—	0.39	0.78
	正己醇	6.51	0.57	0.18	—
	5-甲基-2-呋喃甲醇	—	—	0.06	0.09
	庚醇	0.86	—	0.05	—
	4-甲基-1-戊烯-3-醇	—	—	0.43	—
	异辛醇	3.7	9.77	2.72	—
	正辛醇	1.26	0.46	0.29	0.26
	1-壬醇	7.69	0.98	0.27	0.08
	$\alpha$ -松油醇	—	0.45	0.19	0.17
	2-十二烯醛醇	—	0.25	0.41	—
	3,7,11,15-四甲基-十六碳醇	0.77	0.45	0.31	—
	2,4a,5,8a-四甲基-1,2,3,4,4a,7,8,8a-八氢萘醇	—	—	0.5	1.01
	己基癸醇	—	2.89	2.31	1.04
	3,7,11-三甲基-月桂醇	0.28	0.51	0.3	0.41
	S-(-)-2-甲基-1-丁醇	1.04	—	—	—
	异戊醇	0.6	4.14	—	—
	正戊醇	2.12	—	—	—
	蘑菇醇	0.16	0.71	—	—
	四氢薰衣草醇	0.75	—	—	—
	1-癸醇	8.87	—	—	—
$\beta$ -桉叶醇	—	6.41	—	—	
3,3-二甲基-2-(3-甲基-1,3-丁二烯基)-环己甲醇	—	—	—	0.79	
酮类	3-己酮	—	0.67	0.07	—
	2-丁酮	0.6	—	—	—
	2-甲基-1-庚烯-6-酮	0.57	—	—	—
	香叶基丙酮	2.12	—	—	—
	2,3-丁二酮	—	1.15	—	—
	3-甲基-2-戊酮	—	0.96	—	—
	2,3-己二酮	—	3.46	—	—
	二环己基甲酮	—	0.98	—	—
	(E)-5,9-二甲基-5,8-癸二烯-2-酮	—	0.86	—	—
	4-(1,3,3-三甲基-二环[4.1.0]-2-庚基)-3-烯-2-丁酮	—	0.75	—	—
	3-乙基-2-羟基-2-环戊烯-1-酮	—	—	—	0.56
	2,4-二甲基-3-戊酮	—	—	0.5	—
	2-庚酮	—	0.75	0.11	0.05
	甲基庚烯酮	—	3.28	0.31	—
	2-十一酮	—	0.5	0.14	—
	6-甲基-5-异丙烯基-6,8-壬二烯-2-酮	—	—	0.46	—
	2-十三酮	—	0.71	0.31	—
	马兜铃酮	—	2.44	1.26	0.21
	植酮	11.35	1.1	16.7	4.36
	3,5,6,7,8,8a-六氢-4,8a-二甲基-6-(1-异丙烯基)-2(1H)-萘酮	0.52	1.89	0.58	0.39

续表

类别	化合物	相对含量/%			
		原样	0.5 MPa	1.0 MPa	1.5 MPa
醛类	异戊醛	0.7	1.41	0.41	—
	2-甲基丁醛	—	0.66	0.15	—
	正戊醛	1.3	—	0.39	0.09
	2-甲基戊醛	0.56	—	—	—
	长叶醛	7.38	—	—	0.75
	十六醛	—	0.12	—	0.52
	3-甲基-戊醛	—	—	—	0.75
	糠醛	—	—	—	0.59
	3-糠醛	—	—	—	10.13
	5-甲基呋喃醛	—	—	—	22.28
	2-甲基-4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯基)-3-丁烯醛	—	—	—	2.47
	己醛	7.1	1.96	1.87	0.22
	2-乙基-3-甲基-丁醛	1.07	0.2	0.08	—
	庚醛	1.71	0.99	1.56	—
	正辛醛	0.7	0.4	0.91	0.83
	壬醛	5.09	3.09	5.18	4.2
	癸醛	6.26	3.82	5.26	1.25
	十三醛	—	—	0.06	0.68
	月桂醛	—	0.32	0.5	0.97
	肉豆蔻醛	—	—	0.56	0.68
2-甲基-4-(2,2,6-三甲基-1-环己烯基)-2-丁烯醛	—	—	3.27	—	
酯类	棕榈酸乙酯	4.39	—	—	—
	2,4a,5,8a-四甲基-1,2,3,4,4a,7,8,8a-八氢萘醇乙酸酯	—	10.15	29.34	15.94
	9-炔十八酸甲酯	—	—	1.66	—
酸类	己酸酐	—	0.06	—	—
	D-龙脑酸	—	—	0.02	—
	乙酸	—	—	—	0.21
芳香类	1-甲基萘	0.84	—	—	—
	苯基环己烷	—	4.85	—	—
	苯甲醛	0.31	5.27	1.67	—
	苯乙醛	0.11	0.23	1.32	2.61
	苯乙酮	0.12	0.75	0.27	0.11
	愈创木酚	—	—	0.29	1.35
	苯乙醇	0.07	1.4	0.46	0.15
	苯基丙酮	—	2.06	1.23	—
	对乙烯基愈疮木酚	—	—	—	1.01
	异丁香酚	—	—	0.04	2.95
环己基苯	—	—	3.34	—	
烃类	2,7-二甲基-5-异丙烯基-1,8-壬二烯	—	2.1	—	1.89
	2,6,10,15-四甲基-十七烷	—	0.96	—	—
	十七烷	—	0.61	—	0.33
	香树烯	—	—	—	0.6
	[5.4.0.0(3,8)]十一烷	—	—	—	0.8
	B-瑟林烯	0.86	1.47	0.27	0.37
	5,5-二甲基-1-乙基-1,3-环戊二烯	—	—	1.13	—
其他	2-戊基呋喃	1.29	0.78	0.27	0.39
	甘菊蓝	0.71	—	—	0.14
	榄香醇	0.58	—	—	—
	香橙烯氧化物-(2)	—	—	1.05	—

在醇类风味物质中,1-壬醇在4种样品中均检测到,且占比例较高,具有类似于香茅油气味,存在于

甜橙、苦橙、柚和橡苔等精油中;正己醇在原样(6.51%)中相对含量最高,其次为0.5 MPa(0.57%)、

1.0 MPa (0.18%), 在 1.5 MPa 汽爆秸秆中未检出, 正己醇广泛存在于柑橘类、浆果、茶叶、艾叶、薰衣草等的多种精油中<sup>[7]</sup>, 无色透明, 具有水果芬芳的香味; 另外, 在 3 种汽爆秸秆中检测到  $\alpha$ -松油醇、2, 4a, 5, 8a-四甲基-1, 2, 3, 4, 4a, 7, 8, 8a-八氢萘醇等, 而原样中未检出, 这应该是由汽爆过程中木质素发生少量的降解产生的. 酯类在所检成分占有较大比例, 其中 2, 4a, 5, 8a-四甲基-1, 2, 3, 4, 4a, 7, 8, 8a-八氢萘醇乙酸酯只在汽爆样品中检测到, 可能是由木质素降解的醇与酸酯化生成的. 醛类物质在所检成分中占比例最高, 1.0 MPa 及 1.5 MPa 相比其他 2 种样品数量多, 其中壬醛含量最高, 其次为己醛、癸醛, 壬醛具有玫瑰、柑橘等香气, 有较强的油脂气味, 存在于红茶、绿茶中; 己醛是一种具有青草气及苹果香味的成分<sup>[8]</sup>, 天然品存在于苹果、草莓、茶叶中<sup>[9]</sup>. 在酮类物质中, 植酮含量最高, 其次为马兜铃酮, 具有青木香, 仅在汽爆秸秆中检测到. 原秸秆中的芳香类物质数量远比汽爆处理后的少, 汽爆样品检测到的芳香类成分的种类差别不大, 其中 1.0 MPa 汽爆样品数量最多, 但各成分相对含量存在差别, 例如, 苯甲醛含

量最高, 广泛存在水果和蔬菜中<sup>[10]</sup>, 主要以苷的形式存在于植物的茎皮、叶或种子中, 具有苦杏仁味<sup>[11]</sup>; 其次为苯乙醛、愈创木酚、苯乙醇. 在汽爆秸秆中检测到微量酸性成分(只有乙酸、己酸等), 而原样中未检出, 主要是由于汽爆时, 秸秆在高温高压蒸汽中, 半纤维素组分部分降解, 产生一些酸性物质<sup>[12]</sup>. 此外, 在所检成分中含有少量烯烃类及咪唑类化合物, 其中 2-戊基咪唑、B-瑟林烯含量较高, 这些物质大多具有芳香味, 2-戊基咪唑具有豆香、果香、泥土、青香及类似蔬菜的香韵, 天然存在于欧芹、咖啡、土豆片中.

2.2 汽爆前后不同秸秆中各类别含量的比较

不同秸秆各类别含量见表 2. 在原样(Y)中, 醇、醛两大类物质为主要特征风味, 汽爆处理导致其含量下降, 而酯类、酮类、芳香类含量上升, 但汽爆强度并非越强越好, 强度过高, 糠醛含量增加, 会产生不悦的味道, 秸秆颜色会变暗<sup>[13]</sup>, 且从表 1 看出仅在 1.5 MPa 压力下, 糠醛含量为 0.59% 总之, 从数量及种类上分析 1.0 MPa 汽爆秸秆挥发性成分最多且丰富, 故在 1.0 MPa 压力下汽爆效果较好.

表 2 汽爆前后 4 种秸秆挥发性风味成分 GC-MS 分析结果汇总

Tab. 2 Summary of the volatile flavor components of four kinds of straw before and after steam explosion

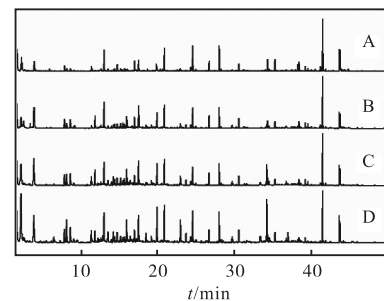
样品	醇类/%	醛类/%	酯类/%	酮类/%	酸类/%	芳香类/%	烃类/%	其他/%
原样	36.64	33.54	6.16	16.79	0	1.52	1.47	2.76
0.5 MPa	29.4	14.9	10.91	21.09	0.06	14.72	6.19	0.92
1.0 MPa	9.19	21.84	31.82	21.59	0.02	9.37	2.11	1.32
1.5 MPa	5.36	48.79	16.33	6.55	0.21	9.4	6.12	0.7

2.3 发酵处理后秸秆挥发性成分分析

将上述汽爆后的秸秆再经发酵处理, 得到秸秆发酵后挥发性风味成分 GC-MS 分析总离子流, 如图 2 所示.

4 种秸秆发酵饲料的挥发性风味成分数量及相对含量差异不大, 说明其风味大致相同. 发酵处理后 4 种秸秆风味成分的主要种类及相对含量见表 3. 由表 3 的分析结果可以看出: 从 YF 中鉴定出 91 种挥发性风味物质, 包括醇类 17 种、醛类 15 种、酮类 8 种、酯类 35 种、酸类 1 种、芳香类 7 种、烃类 6 种及其他 2 种; 从 0.5F 中鉴定出 86 种挥发性风味成分, 包括醇类 22 种、醛类 11 种、酮类 8 种、酯类 27 种、酸类 2 种、芳香类 8 种、烃类 5 种及其他 3 种; 从 1.0F 中鉴定出 93 种挥发性风味成分, 包括醇类 20 种、醛类 15 种、酮类 8 种、酯类 28 种、酸类 3 种、芳香类 9 种、烃类 6 种及其他 4 种; 从 1.5F 中鉴定出

97 种风味物质, 包括醇类 20 种、醛类 15 种、酸类 1 种、酮类 12 种、芳香类 11 种、酯类 27 种、烃类 7 种及其他 4 种.



A. 原秸秆发酵(YF); B. 0.5 MPa 汽爆秸秆发酵(0.5F); C. 1.0 MPa 汽爆秸秆发酵(1.0F); D. 1.5 MPa 汽爆秸秆发酵(1.5F)

图 2 复合处理前后秸秆挥发性风味成分 GC-MS 分析总离子流图

Fig. 2 GC-MS chromatograph of volatile flavor components of straw before and after treatment

2.4 发酵处理后不同秸秆中各类别含量的比较

不同样品中各类别含量见表 4. 原秸秆及汽爆秸秆经生物发酵后, 其风味物质仍主要包括醇类、酯类、芳香类、醛类等, 1.0F 样品所测风味物质较多. 发

酵过程中, 秸秆中的糖经秸秆分解剂中微生物代谢会产生醇类化合物, 含羰基化合物(如酯类)则主要来源于高级醇氧化等<sup>[14]</sup>, 故醇类、酯类物质种类及相对含量增加.

表 3 复合处理前后秸秆主要挥发性风味物质 GC-MS 分析结果

Tab. 3 GC-MS analysis of the major volatile substances of straw before and after steam explosion before and after treatment

类别	化合物	相对含量/%			
		YF	0.5 F	1.0 F	1.5 F
醇类	乙醇	10.54	5.79	3.77	3.31
	异戊醇	4.14	6.67	8.82	6.8
	正己醇	1.5	2.56	2.2	1.89
	庚醇	0.21	2.7	2.52	1.39
	反式-(2-乙基环戊基)甲醇	0.25	1.07	0.7	0.37
	正辛醇	0.28	2.21	2.35	2.43
	顺-3-壬烯醇	—	0.58	0.83	0.65
	1-壬醇	0.46	2.91	3.24	3.98
	正癸醇	0.2	0.71	0.83	0.12
醛类	2-丁烯醛	—	—	—	1.09
	异戊醛	0.6	—	0.82	—
	壬醛	0.23	0.22	0.33	0.31
	癸醛	0.24	0.19	0.24	0.25
	2-甲基-4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯基)-3-丁烯醛	—	—	0.49	0.7
酸类	1-甲基-3-环己烯-甲酸	—	—	—	0.6
	乙酸	0.55	2.52	—	—
酮类	3-羟基-2-丁酮	0.14	0.37	0.51	0.17
	4-羟基-2-丁酮	—	3.08	—	—
	6-甲基-5-乙基-3-庚烯-2-酮	0.45	0.33	0.3	0.17
	植酮	0.87	0.84	0.69	0.39
酯类	乙酸乙酯	6.28	1.67	8.83	11.36
	L-(-)-乳酸乙酯	0.71	—	—	—
	乙酸异戊酯	0.75	1.35	2.18	3.2
	正己酸乙酯	4.55	4.83	2.99	2.8
	乙酸己酯	0.49	0.51	0.73	1.14
	庚酸乙酯	2.55	2.1	1.81	1.53
	辛酸乙酯	5.55	4.21	3.74	3.88
	3-壬烯酸乙酯	0.85	0.6	0.47	0.52
	壬酸乙酯	6.43	3.79	2.7	3.34
	丙位壬内酯	2.79	2.88	2.1	1.55
	癸酸乙酯	6.46	4.07	3.46	3.49
	2,4a,5,8a-四甲基-1,2,3,4,4a,7,8,8a-八氢萘醇乙酸酯	—	0.68	3.11	4.77
	月桂酸乙酯	2.41	1.19	1	0.66
	肉豆蔻酸乙酯	1.63	1.03	0.69	0.38
	9-十六碳烯酸乙酯	0.92	0.49	—	0.17
	棕榈酸乙酯	12.4	8.07	6.32	4.22
亚油酸乙酯	4.3	2.44	2.42	2.21	
油酸乙酯	3.49	1.8	1.73	1.39	
烃类	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	0.41	0.86	1.59	1.29
	3-甲基-壬烷	0.49	0.87	1.11	—
	3,7-二甲基-壬烷	0.49	—	—	0.61
	2,6-二甲基辛烷	—	—	—	0.7
	1-甲基-环癸烷	—	—	—	1.1



续 表

类别	化合物	相对含量/%			
		YF	0.5 F	1.0 F	1.5 F
芳香类	苯乙烯	0.78	2.82	3.09	2.76
	苯甲醛	1.67	0.69	2.29	2.19
	苯乙醛	1.91	1.09	1.34	1.37
	愈创木酚	—	—	—	0.8
	苯乙醇	3.04	5.76	4.75	3.78
	6,7-二甲基-1,2,3,5,8,8a-六氢萘	—	—	—	1.03
	乙酸苯乙酯	0.55	0.92	1.45	2.68
其他	2-甲基吡嗪	—	—	0.16	0.25
	2,6-二甲基吡嗪	—	—	0.1	0.18
	2-戊基呋喃	0.39	0.52	0.4	0.4
	2-丁基四氢化呋喃	0.08	0.14	—	0.19
	2,5-二甲基呋喃	—	0.05	—	—
	2-乙基吡嗪	—	—	0.25	—

乙醇的含量在所测醇类物质中比例最高,是秸秆酒香味的主要来源之一;在酯类成分中,棕榈酸乙酯含量最多,呈微弱蜡香、果爵和奶油香气,用于坚果类食品;其次为己酸乙酯,具有果香味的香料,是浓香型酒的主体香气成分,同样乙酸乙酯、庚酸乙酯、辛酸乙酯、壬酸乙酯、癸酸乙酯也是常见的具有水果香味的食用香精<sup>[15]</sup>,其相对含量在4种样品中存在一定差异.此外,发酵后样品的芳香味物质在检出风

味成分中所占比例有所提高,另外1.0 MPa、1.5 MPa汽爆样品经发酵后产生了一些微量吡嗪类物质,比如2-甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪,具有坚果香、可可和咖啡的香气特点<sup>[16]</sup>,类似于藜麦籽粒淡淡的坚果清香或者人参香;酸性物质如乙酸在YF、0.5F、1.5F饲料中检出,说明其酸味较酒香味浓,发酵品质较次,整体来说,1.0F发酵品质较好,产生风味物质较好.

表4 复合处理前后秸秆挥发性风味成分GC-MS分析结果汇总

Tab. 4 Summary of the volatile flavor components of straw before and after treatment

样品	醇类/%	醛类/%	酯类/%	酸类/%	酮类/%	芳香类/%	烃类/%	其他/%
YF	18.4	2.43	65.73	0.55	1.97	8.25	1.98	0.47
0.5F	27.41	1.5	43.76	2.61	5.3	11.68	2.27	0.71
1.0F	27.22	4.49	46.43	0.5	2.23	13.54	3.32	0.91
1.5F	23.24	5.45	48.1	0.6	1.82	15.23	4.09	1.02

2.5 两种处理方式之间风味物质的比较

由上述汽爆、发酵处理前后风味物质之间的比较,得出1.0 MPa汽爆秸秆得到的风味成分较好,且1.0 MPa汽爆秸秆经发酵后气味较好.两种处理方式秸秆风味成分组成如图3所示.

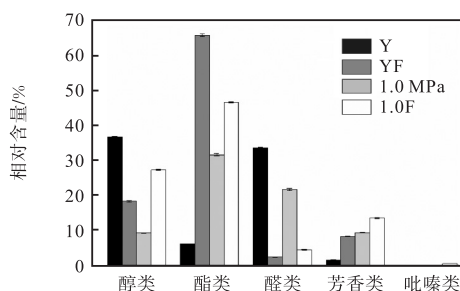


图3 两种处理方式秸秆风味成分组成

Fig. 3 Composition of straw flavor ingredients after two treatments

由图3可知:原秸秆发酵(YF)后,醇类、醛类含量减少,但差异不大,酯类、芳香类物质含量分别增加了59.57%、6.73%,说明生物发酵处理可以改善秸秆的风味;原样(Y)与1.0 MPa汽爆秸秆相比,醛类物质含量差异不大,汽爆秸秆中酯类、芳香类物质含量依次增加了25.66%、7.85%,虽醇类成分减少,但经汽爆后产生的风味物质数量较多,故汽爆处理对改善秸秆饲用价值有潜力;此外1.0 MPa汽爆秸秆再经生物发酵处理(1.0F)后,共产生93种风味物质,酯类、芳香类成分相比于原样分别提高了40.27%、12.02%,具有果香、草香、奶香等的风味物质含量增多,主要包括乙醇、乙酸乙酯、棕榈酸乙酯、丙位壬内酯、己醛等,同时产生吡嗪类等杂环化合物,使得饲料整体呈现特殊香味,并使饲养环境充满浓郁的香味,动物则通过呼吸作用刺激嗅觉,以及利用饲料良好的风味刺

激味觉,再由大脑发出指令,促使消化液分泌和胃肠蠕动,产生食欲,启动采食行为,还有产生的愈创木酚、苯甲醛、呋喃类等物质有减缓饲料氧化的作用<sup>[17]</sup>,延长贮藏时间,提高饲料品质。总之,秸秆经1.0 MPa 汽爆与发酵复合处理后产生的风味物质及呈有的特殊气味更有利于提高其适口性。

### 3 结 论

本实验中采用顶空固相微萃取气质联用方法检测不同处理方式下藜麦秸秆的挥发性风味物质,主要挥发性风味成分包括醇类、酯类、芳香类、醛类、酮类、呋喃类、吡嗪类物质等。结果表明,1.0 MPa 压力汽爆及发酵的复合处理方式可以使秸秆饲料蓬松、柔软,改善其口感提高其感官品质,从而优化其在动物饲料方面的应用。

#### 参考文献:

- [1] 王黎明,马宁,李颂,等. 藜麦的营养价值及其应用前景[J]. 食品工业科技,2014,35(1):381-384.
- [2] 魏爱春,杨修仕,么杨,等. 藜麦营养功能成分及生物活性研究进展[J]. 食品科学,2015,36(15):272-276.
- [3] 肖正春,张广伦. 藜麦及其资源开发利用[J]. 中国野生植物资源,2014,33(2):62-66.
- [4] 张慧玲,王志伟,周中凯. 不同汽爆处理对藜麦秸秆化学组成及纤维结构的影响[J]. 中国农业科技导报,2018,20(7):105-112.
- [5] 陈洪章,刘丽英. 蒸汽爆碎技术原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [6] Pellati F, Benvenuti S, Yoshizaki F, et al. Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry analysis of the volatile compounds of *Evodia species* fruits[J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, 1087(1/2):265-273.
- [7] Umamo K, Hagi Y, Nakahara K, et al. Volatile chemicals identified in extracts from leaves of Japanese mugwort (*Artemisia princeps* Pamp.) [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2000, 48(8):3463-3469.
- [8] 乜兰春,孙建设,陈华君,等. 苹果不同品种果实香气物质研究[J]. 中国农业科学,2006,39(3):641-646.
- [9] 韩宝瑜,周成松. 茶梢和茶花信息物引诱有翅茶蚜效应的研究[J]. 茶叶科学,2004,24(4):249-254.
- [10] Radulović N S, Dorđević A S, Zlatković B K, et al. GC-MS analyses of flower ether extracts of *Prunus domestica* L. and *Prunus padus* L. (Rosaceae) [J]. *Chemical Papers*, 2009, 63(4):377-384.
- [11] Chu F L, Yaylayan V A. Model studies on the oxygen-induced formation of benzaldehyde from phenylacetaldehyde using pyrolysis GC-MS and FTIR [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2008, 56(22):10697-10704.
- [12] 刘强林,赵永锋,孟庆翔. 秸秆汽爆技术及其在反刍动物饲养中的应用[J]. 中国畜牧杂志,2015,51(S1):71-74.
- [13] 贾晶霞,梁宝忠,王艳红,等. 不同汽爆预处理对干玉米秸秆青贮效果的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(20):192-198.
- [14] 皮向荣,郝俊光,陈华磊. 啤酒中的羰基化合物来源及形成机理[J]. 酿酒科技,2010(8):68-73.
- [15] 李洪波,刘胜辉,李映志,等. 顶空固相微萃取和气相色谱-质谱法测定菠萝蜜果肉中的香气成分[J]. 热带作物学报,2013,34(4):755-763.
- [16] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [17] 商杨,边连全,刘显军,等. 饲料香味剂对饲料抗氧化性、育肥猪生长性能和肉质的影响[J]. 饲料工业,2013,34(2):22-27.

责任编辑:郎婧