

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.025

刈割时间对杂交狼尾草成分及厌氧发酵性能影响试验*

李连华 孙永明 孔晓英 袁振宏 甄峰 李东

(中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

摘要:以杂交狼尾草为原料,采用批式中温厌氧发酵工艺,研究生长期为30、60、91、128、175 d的杂交狼尾草的成分及厌氧发酵沼气产量。研究结果表明:刈割时间对原料成分有较大的影响,原料中C质量分数、碳氮比,干物质(TS)、挥发性固体物(VS)和木质素的质量分数随着刈割时间的延长呈升高的趋势。杂交狼尾草在单位土地面积上的干物质产量随刈割时间的延长先增加而后降低,其中生长128 d时刈割干物质产量最高,可达15.01 t/hm²。原料的产气率也随刈割时间的延长先升高而后降低,其中生长60 d的杂交狼尾草的产气性能最高,其挥发性固体物的产气率和产甲烷率分别为0.68、0.37 L/g。综合干物质产量和原料产气率,杂交狼尾草在不同刈割时间下单位面积土地上的生物质量可产沼气量为848.07~6279.73 m³/hm²,相应的年产能可为165.49~292.66 GJ,可见杂交狼尾草是一种有潜力的厌氧发酵原料。

关键词:杂交狼尾草 刈割时间 厌氧发酵 沼气

中图分类号: S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0155-07

引言

能源草本植物由于具有高太阳能转化和水分利用效率,高生物质产量、高适应性、强抗逆能力、环境友好而成为重要的能源植物被开发利用^[1-3]。

自20世纪80年代中期以来,对多年生能源草本植物的研究不断增加。前期的研究主要针对适宜草本植物的筛选,美国和欧洲分别选取柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)和芒属植物(*Miscanthus*)作为重点模式植物展开研究^[4]。目前已开展的多年生能源草本植物的转化利用方式有燃烧^[5]、生物乙醇^[6]和沼气^[1]等。国外已对柳枝稷^[7]、鸭茅(*Dactylis glomerata* L.)、高羊茅(*Fetuca arundinaceae* Schreb.)、蒂莫(*Phleum pratense* L.)^[8]、草芦(*Phalaris arundinaceae* L.)等^[9]能源草的厌氧发酵性能进行了研究。研究的方向主要有:能源草的高效预处理方式、能源草的收割时间和收割频率、单位土地面积能源草生物质产量、能源草可产沼气量和两相反应器的应用等。国内相关研究主要针对不同能源草种类产气潜力的分析,如聚合草(*Symphytum asperum*)^[10]、香根草(*Vetiveria zizanicides*)^[11]和皇竹草(*Herba Andrographitis*)^[12]的厌氧发酵性能研究。迄今国内外对杂交狼尾草的厌氧产气性能研究较少,还未见相关的刈割时间对单位面积上杂交狼尾

草生物质产量和沼气产量影响的报道。

通常为了获取高产优质的牧草,适宜刈割时间必须考虑2项指标:草产量和可消化的营养物质的含量,可根据禾本科植物生长期来确定,一般认为禾本科牧草单位面积的干物质和可消化营养物质总收获量以抽穗至开花期为最高。此外,因品种、种植地气候条件和用途的不同导致草本植物适宜的刈割时期也不同。目前对于以厌氧消化为目的的刈割时间的研究还未见报道。通常6~7月份为生长旺盛期,7~8月份是华南地区的高热高湿季节,这样的天气不利于植物的生长。且木质纤维素类原料的厌氧消化较慢,根据消化工艺的不同一般为30~50 d。结合杂交狼尾草的生长特性、华南地区的气候条件和厌氧消化特性,设定采样间隔为30~47 d,研究在生长期为30、60、91、128、175 d时杂交狼尾草的成分变化、单位面积鲜草产量、干物质产量及其厌氧发酵性能和产沼气潜力。以确定不同刈割时间对单位面积土地上的杂交狼尾草生物质产量和原料厌氧发酵性能的影响,为杂交狼尾草在沼气工程上的应用提供参考。

1 试验材料和方法

1.1 原料

杂交狼尾草于2010年5月在广东省广州市增

收稿日期:2012-12-14 修回日期:2013-01-16

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B02)和广东省科技计划资助项目(2011A030600005)

作者简介:李连华,助理研究员,主要从事生物质转化研究,E-mail: lilh@ms.giec.ac.cn

通讯作者:孙永明,副研究员,主要从事生物质转化研究,E-mail: sunym@ms.giec.ac.cn

城宁西实验基地(23°24'N, 113°64'E)种植,该地区属亚热带季风气候,年降雨量为1 600~1 800 mm,主要集中在4~9月,年平均气温为22.2℃,绝对最高气温38.7℃。土壤pH值为 5.93 ± 0.02 ,有效磷和速效钾质量比分别为 (73.1 ± 0.5) mg/kg和 (64.5 ± 0.5) mg/kg。杂交狼尾草的种植间距为120 cm×60 cm,相应的种植密度为13 889株/hm²。试验小区面积为1 000 m²(50 m×20 m)。整个生长期不基施磷肥,不追施氮肥,不进行人工浇水灌溉,不施农药、除草剂等化学药剂。试验采用的原料分别为2011年3月29日(生长30 d)、4月29日(生长60 d)、5月30日(生长91 d)、7月6日(生长128 d)和8月22日(生长175 d)刈割的鲜草。每次刈割从实验基地随机选取5~10株,留茬10 cm。从实验地刈割取回后首先称量,计算其鲜草质量,再切成3~4 cm的小段,然后在粉碎机中粉碎,粉碎粒径为3~4 mm。粉碎后的原料放在-20℃冰箱中保存。用粉碎后的原料分析化学成分,结果见表1。

表1 不同刈割时间原料的化学成分

Tab.1 Physico-chemical properties of material in at different growth stages

化学成分	生长期/d				
	30	60	91	128	175
C质量分数/%	38.32	39.05	41.14	41.67	41.98
N质量分数/%	1.905	1.085	0.91	0.62	0.48
碳氮比	20.11	35.99	45.21	67.2	87.45
TS质量分数/%	19.56	18.19	25.56	36.21	38.09
VS质量分数/%	16.97	15.84	23.43	34.17	35.52
纤维素质量分数/%	28.02	31.91	37.11	36.64	36.14
半纤维素质量分数/%	13.23	17.74	17.25	16.99	16.57
木质素质量分数/%	15.22	17.66	18.27	22.11	22.87

1.2 接种污泥来源及理化性状

初始接种污泥取自广东省博罗某养猪场沼气工程厌氧发酵污泥。使用前经1 mm筛网过滤除去接种物中大颗粒杂质。初始接种污泥的pH值为7.30,TS及VS质量分数分别为3.59%和2.32%。

1.3 试验装置与操作条件

试验所用反应器容积为40 L(图1),装配有自动控温、机械搅拌、pH值实时监测系统。通过夹层水循环加热的方式保温和增温,使发酵温度控制在 (37 ± 2) ℃;每天搅拌10次,每次10 min,搅拌速率为20 r/min;利用LML-1型湿式气体流量计测定日产气量。每隔2~3 d测定气体中CH₄和CO₂体积分数。

试验时将已粉碎并称量的鲜草(2 000 g,生长128 d和175 d刈割的鲜草加入量为1 600 g)放入反应器中,反应器内的接种物加入量为25 kg左右。

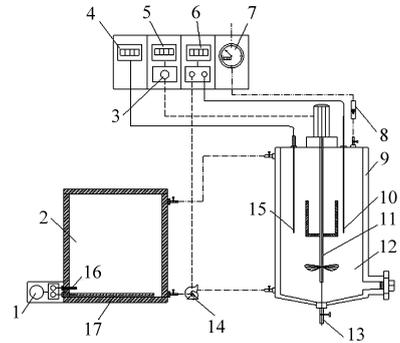


图1 40 L厌氧发酵试验装置示意图

Fig.1 Set-up of 40 L anaerobic digestion

1. 温控仪 2. 恒温热水罐 3. 转速调节器 4. pH值显示仪
5. 时空开关 6. 温控仪 7. 湿式气体流量计 8. 转子流量计
9. 温水夹层 10. 热电偶 11. 搅拌装置 12. 消化反应器
13. 采样口 14. 热水循环泵 15. pH探头 16. 热电偶 17. 加热棒

到无气体产出时为厌氧发酵过程结束。

1.4 试验内容、仪器及方法

TS和VS质量分数分别采用101℃干燥和550℃煅烧法测定。

C和N质量分数采用Vario EL元素分析仪测定。

金属元素Na、Mg、Ca、Co、Cr、Al、As、Ba、Cd、Cr、Cu、Mn、Fe、Ni、Pb、Zn采用Thermo Jarrell Ash公司的IRIS 1000 ER/S全谱直读型等离子体耦合发射光谱仪(ICP)进行分析。

纤维素、半纤维素和木质素质量分数根据美国可再生能源实验室标准分析方法(LAP, NREL)进行测定。

气体中CH₄和CO₂的体积分数采用HP-6890型高效气相色谱仪测定。内置热导检测器(TCD),测样温度为150℃;载气为Ar;进样口温度为100℃;柱箱为程序升温,初始温度为40℃,保持2 min,再以10℃/min的升温速率升到80℃并保持1 min。

生物质产量计算参见文献[13]。

2 结果与分析

2.1 杂交狼尾草中化学成分随刈割时间的变化

不同刈割时间原料的化学成分如表1所示。可见刈割时间对原料成分有较大的影响。原料中C、TS、VS及木质素的质量分数随生长时间延长呈升高的趋势。N的质量分数随着刈割时间的延长逐渐降低。由于N质量分数的降低,原料的碳氮比随刈割时间的延长而增加。Heiermann等^[1]的试验发现与产气量有关的几个参数随着作物的生长有较大的改变,通常干物质、粗纤维含量和碳氮比升高,而粗蛋

白、粗脂肪和糖含量下降。咸育龙等^[14]研究了北京地区种植的杂交狼尾草营养成分随生长时间的变化情况,显示随着生长时间的延长,杂交狼尾草含水率和粗蛋白含量大体上逐渐下降,中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量大体上逐渐上升。本试验中杂交狼尾草中的纤维素和半纤维素的质量分数随着刈割时间的延长先增加后稍有降低,其中纤维素质量分数由 28.02% (生长 30 d) 升高至 37.11% (生长 91 d),质量分数增加了 32.44%;半纤维素含量增加了 25.47%;从已有文献可见,纤维素和半纤维素的降解速率与它们在原料中的状态有关系,如果纤维素以木质素包裹态存在,那么木质素可阻止纤维素酶与纤维的接触。如果纤维素以结晶态存在,纤维素酶可附着在上面,水解相对较快,导致丙酸和丁酸的形成^[15]。木质素的质量分数显著增加,从 15.22% 增加到 22.87%。普遍的观点认为木质素在厌氧过程中不降解,这主要是因为解聚木质素的胞外酶需要分子氧,并且在厌氧环境中它们的氧化反应无法开始^[16]。但也需要注意木质素并不是唯一影响厌氧反应的因素。原料的热值变化不大,在 15 469 ~ 17 882 kJ/kg 之间。

原料中的金属质量比见表 2。从表中可见原料中 Na、Mg 和 Ca 质量比较高,分别为 2 370 ~ 5 277、943 ~ 1 188 和 1 344 ~ 3 465 mg/kg。Fe、Mn 和 Al 的质量比也比较高,分别为 248 ~ 744、130 ~ 240 和 47 ~ 448 mg/kg。原料中也检测到了 Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn,原料中未检测到 As。很多盐类特别是金属离子,超过一定质量浓度时都有强烈的抑制作用,如 Na⁺ 质量浓度在 100 ~ 200 mg/L, Ca²⁺ 在 100 ~ 200 mg/L 和 Mg²⁺ 在 75 ~ 150 mg/L 时可以刺激发酵过程;而质量浓度的增加,当 Na⁺ 为 3 500 ~ 5 500 mg/L, Ca²⁺ 为 2 500 ~ 4 500 mg/L 和 Mg²⁺ 为 1 000 ~ 1 500 mg/L 时,则产生中等强度抑制;当质量浓度达到 8 000 mg/L 的 Na⁺, 8 000 mg/L 的 Ca²⁺ 和 3 000 mg/L 的 Mg²⁺ 时,会对发酵过程产生强烈的抑制作用^[17],其主要原因在于盐质量浓度升高时,水的渗透压也会随之升高,使生物细胞脱水引起细胞原生质分离,从而导致微生物细胞破裂而死亡。原料中金属元素对发酵性能的影响与其在发酵过程中溶出释放到发酵液中的浓度有关,这里假设厌氧发酵过程中杂交狼尾草中的这些金属元素全部以离子形态进入厌氧发酵液中,则可以推算出发酵液中 Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的质量浓度范围,30 d、60 d 和 91 d 刈割杂交狼尾草在发酵液中的 Na⁺ 质量浓度分别为 78.24、96.61、55.55 mg/L, Mg²⁺ 质量浓度分别为 23.25、16.75、24.1 mg/L, Ca²⁺ 质量浓度分别为

67.75、42.30、34.35 mg/L,可见这几种金属离子都远远低于中等抑制浓度。陈广银等^[18]以互发米草为厌氧发酵原料,由于互发米草为盐生植物,原料中的 Na⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 质量浓度均高于本试验中所测量的质量浓度,该文分析显示除 5 月份收割的原料中 Na⁺ 质量浓度存在抑制产气的可能外,其他离子的质量分数超出其起促进作用范围的幅度不多,尚未进入中等抑制质量浓度的范围。Meltem 等^[19]研究了 Cu、Ni、Zn 和 Pb 对厌氧发酵的毒性作用,试验显示这些元素对产甲烷活性的相对抑制作用为 Cu 大于 Ni,相似于 Zn 大于 Pb,并且当其质量浓度大于 10 mg/L 时产气量随着质量浓度的增加而降低。

表 2 不同刈割时间原料中的金属质量比

Tab. 2 ICP analyse of material in at different

金属	growth stages		
	生长 30 d	生长 60 d	生长 91 d
铝 (Al)	448.19	243.83	47.42
砷 (As)	0	0	0
钡 (Ba)	17.80	8.62	6.99
钙 (Ca)	3 465.09	2 325.56	1 344.68
镉 (Cd)	0.53	0.15	0.16
钴 (Co)	4.06	6.01	7.91
铬 (Cr)	14.65	23.97	4.68
铜 (Cu)	56.74	11.49	29.66
铁 (Fe)	744.66	439.82	248.36
镁 (Mg)	1 188.40	919.06	943.27
锰 (Mn)	240.33	142.11	130.99
钠 (Na)	4 007.01	5 277.04	2 370.11
镍 (Ni)	4.83	8.43	3.96
铅 (Pb)	8.81	8.73	14.76
锌 (Zn)	36.98	32.12	42.18

2.2 刈割时间对杂交狼尾草厌氧发酵性能的影响

不同刈割时间原料的日产气率见图 2。可见不同刈割时间下杂交狼尾草产气趋势总体一致,一般是在原料加入后的第 2 ~ 3 天出现产气高峰,这主要是原料中生物容易利用的组分被消耗。之后产气量逐渐下降。从图可见,日产气率的变化可以分为 3 个阶段:第 1 阶段是水解阶段,主要是在发酵前 3 天,这一阶段主要是原料的易生物降解成分被分解为小分子物质,产生的主要气体为 CO₂。第 2 阶段是产甲烷的旺盛期,经气相色谱测定可知,沼气中的 CH₄ 体积分数一般在 50% 以上,说明发酵系统已经进入产甲烷阶段,该阶段可从第 4 天持续到第 10 天(生长 30 或 60 d 时刈割的杂交狼尾草)或 15 天(生长 128 d 时刈割的原料),沼气的体积产量可占总产气量的 80% 左右;第 3 阶段是产沼气衰落期,日产气率趋于稳定,这表明发酵液中可利用物质含量过

低,产甲烷菌可利用基质不足,厌氧发酵基本结束。不同刈割时间下的杂交狼尾草发酵的主要区别在于厌氧发酵所需的时间。从图2可见,随着刈割时间的延长,原料完全停止产气所需的时间由19 d(生长30 d的杂交狼尾草)增加至54 d(生长175 d的杂交狼尾草)。这主要是因为随着刈割时间的延长杂交狼尾草的木质化程度加大,降低了原料的可消化性。

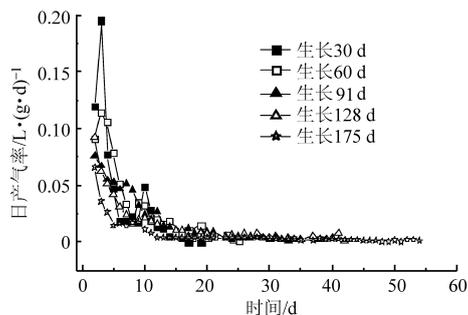


图2 不同刈割时间下杂交狼尾草发酵过程中日产气率变化曲线

Fig.2 Changes of daily biogas production ratio of material at different growth stages

pH值是沼气发酵过程性能的一个直接指标,一般适宜发酵的pH值应在6.8~7.2之间^[20]。发酵过程中pH值变化曲线如图3所示。各刈割时间下发酵过程中的pH值变化趋势一致,一般是先降至发酵的最低值,而后升高,之后pH值呈波动变化。pH值的这种变化与微生物的活动密切相关。在发酵初期水解酸化过程占主要地位,通过发酵性细菌、产氢产乙酸菌和同型产乙酸菌的联合作用使原料中的生物容易利用的基质迅速转化为挥发性脂肪酸(VFA),使发酵系统产生一定程度的酸累积,导致pH值迅速降低,一般pH值在第2天降至最低(7.03~7.35)。之后随着发酵的进行,有机酸不断被产甲烷菌消耗,产生CH₄和CO₂,pH值逐渐上升,并稳定在7.4~7.7之间。各发酵组pH值的主要区别在于随着刈割时间的延长,其发酵体系的pH值升高,于2011年3月29日收割的杂交狼尾草其发酵体系pH值稳定在7.38~7.48之间,生长60 d

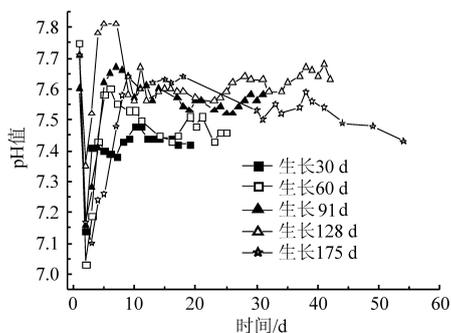


图3 发酵过程中pH值变化曲线

Fig.3 Changes of pH during anaerobic digestion

的杂交狼尾草其发酵体系pH值稳定在7.43~7.53之间,生长91 d的其发酵体系pH值稳定在7.54~7.67之间,生长128 d的其发酵体系pH值稳定在7.56~7.68之间,而生长175 d的其发酵体系pH值稳定在7.43~7.63之间。pH值产生这种变化的原因可能是体系内碱金属溶解并在体系内积累所致。

不同刈割时间下杂交狼尾草厌氧发酵过程中CH₄体积分数见图4。气体中CH₄体积分数的变化趋势相同,一般是CH₄体积分数迅速上升,在4~7 d达到最大值,然后CH₄体积分数降低,最后可稳定在45%~55%之间。生长60 d的杂交狼尾草在厌氧消化过程中观测到了最高的CH₄体积分数,其最高和平均CH₄体积分数分别为62%和54%;生长128 d的原料其CH₄体积分数最低,厌氧消化过程中测量得到最高和平均CH₄体积分数分别为51%和45%;生长30 d、91 d和175 d的杂交狼尾草厌氧发酵过程中其最高CH₄体积分数分别为55%、59%和57%。本试验中的产甲烷量与已有文献报道接近或稍低, Yang等^[21]以*Spartina alterniflora*为发酵原料时其甲烷体积分数从53%增加到62%。从已报道的文献来看可以通过3种方式来增加CH₄含量或总产气量(产甲烷量):①采用两相反应器。Yu等^[22]用两相反应器进行草的生物消化性能研究,其平均CH₄体积分数可达到71%。②添加微量元素。Demirel等^[23]认为微量元素对能源草厌氧发酵性能的影响研究还相对较少,而添加微量元素具有可提高能源草产气潜力的可能性。③预处理。Jackowiak等^[24]发现经微波预处理的柳枝稷虽然其产甲烷率未变,但可以增加反应速率。

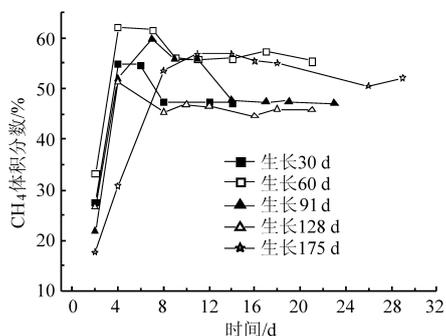


图4 不同刈割时间下气体中CH₄体积分数变化曲线

Fig.4 CH₄ concentration of biogas from material at different growth stages

从表3产气特性和图5累积产气量可见,生长60 d的杂交狼尾草的厌氧消化性能最高,其单位质量总固体(TS)和挥发性固体(VS)产气率分别为0.60、0.68 L/g,比生长30 d的杂交狼尾草的厌氧发酵产气能力提高7.94%~11.11%;生长91 d刈割

的杂交狼尾草的厌氧消化性能同 60 d 刈割的原料相比,TS 的产气率相同,但基于 VS 的产气率提高了 14.75%;生长 175 d 的杂交狼尾草的产气率最低,相比生长 60 d 的产气率降低了 53.13% (基于 TS 计算)和 56.76% (基于 VS 计算)。生长 60 d 时刈割的杂交狼尾草获得了最高的产甲烷率,总固体和挥发性固体的产甲烷率为 0.32、0.37 L/g;生长 91 d 的原料由于其沼气中 CH₄ 含量降低,导致产甲烷率相比 60 d 刈割时降低 12.50% (总固体,0.28 L/g)和 24.32% (挥发性固体,0.28 L/g);生长 175 d 的杂交狼尾草产甲烷率最低。可见刈割时间对原料的厌氧消化性能有较大影响。Masse 等^[25]研究了柳枝稷的产气性能随生长时间的变化,结果显示随着作物的生长,柳枝稷的挥发性固体物的甲烷产率从夏季中期的 0.266 ~ 0.309 L/g 降至秋季初期的 0.191 ~ 0.25 L/g。

表 3 不同刈割时间下杂交狼尾草的产气特性

Tab.3 Specific biogas and methane yields of material at different growth stages L/g

生长期 /d	沼气产气率		产甲烷率	
	TS	VS	TS	VS
30	0.54	0.63	0.25	0.29
60	0.60	0.68	0.32	0.37
91	0.60	0.61	0.28	0.28
128	0.42	0.44	0.19	0.20
175	0.30	0.32	0.15	0.16

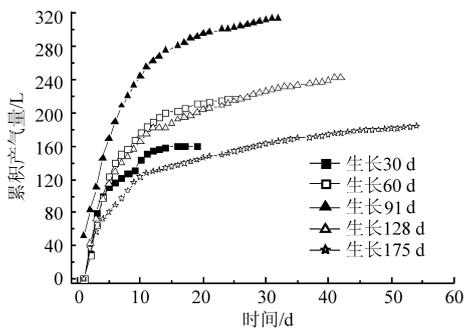


图 5 不同刈割时间下杂交狼尾草的累积产气量

Fig.5 Cumulative biogas production at different growth stages

利用原料中 C、N、H 和 O 的质量分数通过 Buswell 方程可计算杂交狼尾草 1 号在不同刈割时间下的理论产甲烷能力分别为 414 mL/g (生长 30 d)、426 mL/g (生长 60 d)、408 mL/g (生长 91 d)、417 mL/g (生长 128 d)和 394 mL/g (生长 175 d),杂交狼尾草 1 号实际产 CH₄能力分别为理论产 CH₄能力的 70%、87%、72%、48%和 42%。可见,随着刈割时间的延长杂交狼尾草 1 号的厌氧消化转化力降低,究其原因有:①与原料中木质素含量的增加有关,木质素的包裹结构会阻碍微生物对纤维素和半

纤维素转化和利用。②N 质量分数的降低和碳氮比的升高。一般认为适宜的发醇碳氮比在 20 ~ 32 之间,若是碳氮比失衡就会限制产甲烷速率。从表 1 可见在植物生长后期,所采集的原料的碳氮比远远高于适宜的碳氮比要求。

2.3 单位土地面积上生物质产量及产沼气潜力

不同刈割时间的杂交狼尾草生物质产量见表 4。可见随着刈割时间的延长,单位土地面积上的鲜草产量和干物质产量增加。其中生长 30 d 时刈割,杂交狼尾草的干物质产量为 1.56 t/hm²;生长 60 d 时刈割,干物质产量为 3.21 t/hm²,比生长 30 d 时刈割增加 105.77%;生长 91 d 时刈割,干物质产量比生长 60 d 时刈割增加 126%;生长 128 d 时刈割干物质产量比生长 91 d 时刈割增加 107%;生长 175 d 时刈割干物质产量比生长 128 d 时刈割增加 2.67%。可见单位土地面积上的杂交狼尾草干物质产量随着刈割时间的延长而增加,但增加幅度有减小的趋势。单位土地面积上的生物质产量的可产沼气量也随着刈割时间的延长而增加,其中生长 60 d 时刈割单位土地面积上的干物质产量可产沼气量比生长 30 d 时刈割增加 126%;在生长 91 d 时刈割,单位土地面积上的干物质产量可产沼气量比生长 60 d 时刈割增加 112%;在生长 128 d 时刈割,单位土地面积上的干物质产量可产沼气量比生长 91 d 时刈割的增加 55%;在生长 175 d 时刈割,单位土地面积上的干物质产量可产沼气量比生长 128 d 时刈割的降低 21%,可见随着刈割时间的延长单位土地面积上的干物质产量可产沼气量虽然一直在增加,但增加的幅度有减小的趋势,并且当杂交狼尾草生长到一定阶段后由于干物质产量和产气率的降低导致单位土地面积上干物质产量可产沼气量的下降。按试验中的刈割时间可推算出年刈割频率分别为 12 次、6 次、4 次、2.8 次(按 3 次计算)和 2 次,这里假设不同刈割频率下单位土地面积上的生物质产量和原料的产气率相同(由文献可知不同刈割频率下单位土地面积可产生物质^[13]和原料的产气率^[1]都有一定差别),则不同刈割频率下每年单位土地面积上的干物质可产沼气量分别折算为 10 176.84、11 482.74、16 233.6、18 838.29、9 980.68 m³/(hm²·a)。相应的年产甲烷量分别为 4 783.11、6 200.68、7 792.13、8 458.39、5 041.24 m³/(hm²·a),本试验所得单位土地面积上的生物质产量和产甲烷量与 Amon 等^[26]的研究结果接近。若按 1 m³CH₄可产 0.034 6 GJ 的能量计算^[27],则相应的年产能为 165.49、214.54、269.61、292.66、174.43 GJ。

表4 杂交狼尾草在不同刈割时间下的单位面积土地上的生物质产量及产沼气量

Tab.4 Biomass and biogas yield of *Pennisetum hybrid* per hectare at different growth stages

生长期 /d	刈割鲜草 质量/kg	产鲜草质量 /t·hm ⁻²	产干物质质量 /t·hm ⁻²	产沼气量 /m ³ ·hm ⁻²
30	2.868	7.97	1.56	848.07
60	4.958	17.22	3.21	1 913.79
91	12.25	28.36	7.25	4 058.41
128	14.92	41.44	15.01	6 279.73
175	15.62	43.38	15.41	4 990.34

3 结论

(1) 刈割时间对原料中各组分含量有较大的影响,其中 TS、VS 和木质素的质量分数呈升高的趋势,而 N 质量分数则是逐渐减少。原料中 Na⁺、

Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 3 种离子质量浓度较高,发酵过程中需要注意这些离子的抑制作用。

(2) 刈割时间对原料消化性能有较大的影响。随着刈割时间的延长,原料所需厌氧发酵时间延长。并且杂交狼尾草在生长 60 d 时刈割时其产气性能最高,其挥发性固体物的产气率和产甲烷率分别为 0.68、0.37 L/g。生长 91 d 的杂交狼尾草的产气率与生长 60 d 的接近,但挥发性固体物的产甲烷率则降低了 24%。生长 175 d 的杂交狼尾草的产气率最低。

(3) 综合干物质产量和原料产气率,杂交狼尾草在不同刈割时间下单位面积土地上的生物质产量可产沼气量为 848.07 ~ 6 279.73 m³/hm²,相应的年产能 165.49 ~ 292.66 GJ。

参 考 文 献

- Prochnow A, Heiermann M, Plochl M, et al. Bioenergy from permanent grassland—a review: 1. Biogas [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 4 931 ~ 4 944.
- Taherzadeh M J, Karimi K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2008, 9(9): 1 621 ~ 1 651.
- Masse D. Methane yield from switchgrass harvested at different stages of development in Eastern Canada [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(24): 9 536 ~ 9 541.
- Lewandowski I, Scurlock J M O, Lindvall E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25(4): 335 ~ 361.
- Prochnow A, Heiermann M, Plochl M, et al. Bioenergy from permanent grassland—a review: 2. Combustion [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 4 945 ~ 4 954.
- Vadas P A, Barnett K H, Undersander D J. Economics and energy of ethanol production from alfalfa, corn, and switchgrass in the upper midwest, USA [J]. *Bioenergy Research*, 2008, 1(1): 44 ~ 55.
- Jackowiak D, Frigon J C, Ribeiro T, et al. Enhancing solubilisation and methane production kinetic of switchgrass by microwave pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3 535 ~ 3 540.
- Seppala M, Paavola T, Lehtomaki A, et al. Biogas production from boreal herbaceous grasses-specific methane yield and methane yield per hectare [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(12): 2 952 ~ 2 958.
- Geber U. Cutting frequency and stubble height of reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.): influence on quality and quantity of biomass for biogas production [J]. *Grass and Forage Science*, 2002, 57(4): 389 ~ 394.
- 郑敏,邱凌,王晓曼,等. 聚合草厌氧发酵产气潜力的试验 [J]. *西北农业学报*, 2009, 18(6): 365 ~ 368.
Zheng Min, Qiu Ling, Wang Xiaoman, et al. Potential of the biogas fermentation of comfrey [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 18(6): 365 ~ 368. (in Chinese)
- 胡晓明,张建萍,张无敌,等. 香根草中温发酵产沼气的试验研究 [J]. *科技信息*, 2008(27): 8 ~ 9.
Hu Xiaoming, Zhang Jianping, Zhang Wudi, et al. Experimental study on mesophilic biogas fermentation with *Vetiveria zizanioides* [J]. *Science and Technology Information*, 2008(27): 8 ~ 9. (in Chinese)
- 罗艳,郑正,杨世关,等. 皇竹草厌氧发酵产沼气的特性 [J]. *环境化学*, 2010, 29(2): 258 ~ 161.
Luo Yan, Zheng Zheng, Yang Shiguan, et al. Study on the fermentation characteristics of herba and rogaphitis [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(2): 258 ~ 161. (in Chinese)
- 王静,沈文彤,张蕴薇,等. 种植密度和刈割频率对杂交狼尾草产量和品质的影响 [J]. *草地学报*, 2010, 18(4): 589 ~ 593.
Wang Jing, Shen Wentong, Zhang Yunwei, et al. Effect of planting density and cutting frequency on biomass yield and quality of *pennisetum americanum* P. purpureum [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(4): 589 ~ 593. (in Chinese)
- 咸育龙,王玉培,曾宪竞,等. 杂交狼尾草生长过程中营养成分含量与生物量变化规律的研究 [J]. *中国奶牛*, 2009(10): 16 ~ 19.
Xian Yulong, Wang Yupei, Zeng Xianjing, et al. Studies on the changes of nutrient contents and biomass of *pennisetum hybrid* during growing period [J]. *China Dairy Cattle*, 2009(10): 16 ~ 19. (in Chinese)
- Thamsiriroj T, Murphy J D. A critical review of the applicability of biodiesel and grass biomethane as biofuels to satisfy both

- biofuel targets and sustainability criteria[J]. *Applied Energy*, 2011, 88: 1 008 ~ 1 019.
- 16 Pokoj T, Klimiuk E, Budzynski W, et al. Theoretical and observed biogas production from plant biomass of different fibre contents[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(24): 9 527 ~ 9 535.
- 17 袁振宏,吴创之,马隆龙. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:79.
- 18 陈广银,郑正,常志州,等. 不同生长期互花米草的理化特性及厌氧发酵特性[J]. *农业工程学报*,2011,27(3):260 ~ 265. Chen Guangyin, Zheng Zheng, Chang Zhizhou, et al. Characteristics of anaerobic digestion and physico-chemical properties of *Spartina alterniflora* at different growth stages[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 260 ~ 265. (in Chinese)
- 19 Sarioglu M, Akkoyun S, Bisgin T. Inhibition effects of heavy metals (copper, nickel, zinc, lead) on anaerobic sludge[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 23(1~3): 55 ~ 60.
- 20 Ward A J, Hobbs P J, Holliman P J, et al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(17): 7 928 ~ 7 940.
- 21 Yang S G, Li J H, Zheng Z, et al. Characterization of *Spartina alterniflora* as feedstock for anaerobic digestion[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(4): 597 ~ 602.
- 22 Yu H W, Samani Z, Hanson A, et al. Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion[J]. *Waste Management*, 2002, 22(1): 1 ~ 5.
- 23 Demirel B, Scherer P. Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(3): 992 ~ 998.
- 24 Pauss A, Jackowiak D, Frigon J C, et al. Enhancing solubilisation and methane production kinetic of switchgrass by microwave pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3 535 ~ 3 540.
- 25 Masse D, Gilbert Y, Savoie P, et al. Methane yield from switchgrass harvested at different stages of development in Eastern Canada[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(24): 9 536 ~ 9 541.
- 26 Amon B, Amon T, Kryvoruchko V, et al. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(17): 3 204 ~ 3 212.
- 27 Frigon J C, Mehta P, Guiot S R. Impact of mechanical, chemical and enzymatic pre-treatments on the methane yield from the anaerobic digestion of switchgrass[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012,36:1 ~ 11.

Effect of Growth Stages on Performance of Anaerobic Digestion and Physico-chemical Properties of *Pennisetum* Hybrid

Li Lianhua Sun Yongming Kong Xiaoying Yuan Zhenhong Zhen Feng Li Dong
(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The effects of growth stages on the physico-chemical properties and anaerobic digestion performance of *Pennisetum* hybrid were studied in batch mesophilic experiments. The results indicated that the content of C, TS, VS and lignin increase over time at different growth stages. The dry matter yield per hectare firstly increases then declines, with the highest dry matter of 15.01 t/hm². Biogas production performance of *Pennisetum* hybrid firstly increases and then decreases, and the maximum biogas yield is obtained when *Pennisetum* hybrid is harvested at 60 d growth stage, which are 0.68 L biogas/g VS and 0.37 L methane/g VS. Based on the biomass yield per hectare and biogas production of *Pennisetum* hybrid, the area specific biogas yields of 848.07 ~ 6 279.73 m³/hm² can be achieved from the *Pennisetum* hybrid harvested at different growth stage, the corresponding energy production of 165.49 ~ 292.66 GJ per year. Biogas production from *Pennisetum* hybrid suggests that the energy grass is a potential material for anaerobic digestion.

Key words: *Pennisetum* hybrid Growth stages Anaerobic digestion Biogas