

氨化预处理参数对麦秸厌氧消化产气性能的影响

杨懂艳^{1,2}, 李秀金¹, 庞云芝^{1*}, 张亚甜¹, 袁海荣¹, 刘彦萍¹

(1.北京化工大学资源与环境研究中心, 北京 100029; 2.北京市环境保护监测中心, 北京 100044)

摘要: 为了降低其他碱法预处理秸秆厌氧发酵另加氮源的限制, 用氨水在不同的含水率下对麦秸进行预处理, 并对不同进料浓度下麦秸的产气情况进行研究, 结果表明: 增加预处理的含水率能够显著提高氨化预处理的效果。80%含水率氨化预处理后麦秸在 3 种负荷下获得了 25.7~29.2 L、35.4~38.1 L 和 40.5~44.9 L 的累积产气量, 比未处理麦秸分别提高了 14%~29%、26%~36% 和 23%~37%。其中 80%含水率、4%氨化预处理后麦秸在 $65 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 进料浓度时获得最大 $200 \text{ mLCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$ 的甲烷产量, 比未处理麦秸提高了 36%; 其总固体(TS)和挥发性固体(VS)的降解率分别比相同进料浓度下未处理麦秸提高了 29% 和 30%, 而消化时间节省了 24%。氨化预处理能够有效降低麦秸主要组分含量, 提高冷、热水及 1%NaOH 提取物含量, 从而有效改善麦秸组分及结构, 提高麦秸的厌氧消化产气性能。

关键词: 氨化; 预处理; 麦秸; 厌氧消化

中图分类号: S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)01-0185-06 doi:10.11654/jaes.2013.01.027

Research of Ammonia Pretreatment Parameters on Biogasification Efficiency of Wheat Straw

YANG Dong-yan^{1,2}, LI Xiu-jin¹, PANG Yun-zhi^{1*}, ZHANG Ya-tian¹, YUAN Hai-rong¹, LIU Yan-ping¹

(1.Center for Resources and Environmental Research, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2.Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100044, China)

Abstract: Aqueous ammonia was used to pretreat wheat straw to improve biodegradability and provide nitrogen source for enhancing biogasification efficiency. Three doses of ammonia (2%, 4% and 6%, dry matter), and three moisture contents (30%, 60% and 80%, dry matter) were applied to pretreat wheat straw for 7 days. The pretreated wheat straws were then anaerobically digested at three loading rates ($50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $65 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $80 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) to produce biogas. The results showed that the biogasification efficiency of ammonia pretreatment wheat straws could be improved by enhancing the moisture levels. The total biogas productions of ammonia-pretreated wheat straws at 80% moisture content were 25.7~29.2 L, 35.4~38.1 L and 40.5~44.9 L, increased by 14%~29%, 26%~36% and 23%~37%, respectively, as compared to those of untreated ones. The wheat straw pretreated at 80% moisture content and 4% ammonia achieved the highest methane yield of $200 \text{ mLCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{VS}$ at the loading rate of $65 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. The reductions of total solids and volatile solids were improved by 29% and 30% respectively, and the digestion time was reduced 28%, as compared to that of untreated one. The main chemical compositions and extractives of wheat straws were also analyzed; it showed that the decomposition of cellulose and hemicellulose content, the contents of cold-water and hot-water extractives could be improved as moisture contents enhanced. The changes of main compositions and structures were believed to contribute to the improvement of biogas production of ammonia-pretreated wheat straws.

Keywords: ammonification; pretreatment; wheat straw; anaerobic digestion

21 世纪以来, 全球经济发展模式发生转变, 加上化石能源的价格飞涨和持续供给安全、全球气候变化等问题的突出, 欧美发达国家相继开始探索新能源领

域, 开发新能源技术、优化能源结构。生物质能作为重要新能源, 因其产量大、可再生性和碳中性等优势而备受关注。中国作为发展中国家, 能源与环境的矛盾也日益突出, 大力开发生物质能高度显现减排效应和清洁效应, 成为解决能源和环境问题的重要途径^[1-2]。

农作物秸秆作为生物质能的主要原料, 在我国有利用秸秆产沼气的优良传统。然而由于秸秆细胞壁纤维素的丝状结晶结构以及木素嵌入式的连接, 使产

收稿日期: 2012-05-28

基金项目: 中美国际科技合作项目 (2011DFA90800)

作者简介: 杨懂艳 (1979—), 女, 安徽濉溪人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事固废资源化研究。E-mail: ydongyan@163.com

* 通信作者: 庞云芝 E-mail: xjli@mail.buct.edu.cn

甲烷菌很难获得所需的小分子有机物,导致产气效率低^[3]。通过物理、化学、生物等预处理技术可以有效改善秸秆的结构组成,提高秸秆的利用率^[4-5]。其中通过 NaOH 化学预处理提高秸秆产气效率的研究报道最为详细^[6-10]。然而,厌氧消化系统中微生物的生长不仅需要小分子有机物作为发酵原料,氮元素的缺乏同样会造成厌氧消化效率的下降,而氨化预处理不仅能起到相同的碱化预处理效果,还能为厌氧微生物提供氮素来源。国内外专家通过氨化预处理提高秸秆含氮量和消化率的结论表明,含水率对氨化预处理的效果影响显著^[11-12]。本试验选用氨水作为氨化预处理试剂对麦秸进行预处理,考察不同的含水率和氨水添加量预处理的效果,及其对麦秸厌氧消化性能的影响,为麦秸的大规模沼气工程应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 原料

试验所用麦秸取自北京延庆,麦秸自然风干后,首先用铡刀将整株秸秆截成 1~2 cm 的小段,用球磨粉碎机粉碎后过 40 目筛备用。接种物为海淀区六里屯污水处理厂二级消化池消化污泥。接种前污泥密封,置于 4 ℃ 的冰箱中冷藏保存,自然沉降后用虹吸法去除多余的水分备用。污泥的总固体(TS)、挥发性固体(VS)及悬浮固体(SS)浓度分别为 9.45、7.51、9.12 g·L⁻¹。

1.2 试验方法

用 25% 含量的氨水(NH₃·H₂O)作为氨化预处理化学试剂,按照质量分数分别为 2%、4% 和 6% 的 NH₃ (相对于麦秸干物质量)添加适量氨水后,按照下述含水率(MC)公式添加水,调节氨化预处理麦秸含水率为 30%、60% 和 80%。当含水率为 80% 时,麦秸处于水饱和状态,此时无多余的水流出,可有效避免氨废液的产生^[10]。将样品混合均匀后密封,置于 35 ℃ 恒温箱中,7 d 后取出作为厌氧发酵原料。

$$MC\% = \frac{\text{称取麦秸重量} \times \text{麦秸含水率} + \text{氨水} \times \text{氨水中的含水率} + \text{添加水重量}}{\text{麦秸重量} + \text{氨水重量} + \text{添加水量}} \times 100\%$$

100%

将预处理后麦秸按照 50、65、80 g·L⁻¹ 的进料浓度添加到 2 L 锥形瓶中,并加入适量的接种泥,保证各个反应器混合液悬浮物(MLSS)浓度均为 15 g·L⁻¹^[13],加水至 1.5 L 并混合均匀。测定混合液 pH 值,若 pH<6.8 或 pH>8.0,则分别用 Ca(OH)₂ 或 HCl 溶液调节至 6.8~8.0;将排气管路接好,锥形瓶放入振荡

器,设定温度为 35 ℃、转速为 120 r·min⁻¹,启动振荡箱进行中温厌氧消化试验。将未处理麦秸按照相同的方法进行厌氧消化试验,但加入一定量的氯化铵以调节系统 C/N 为 25:1,进行对照试验。

1.3 测定项目

厌氧消化过程中记录日产气量,并计算相应的累积产气量。沼气中甲烷含量用天美 7890 II 气相色谱仪检测,根据日产气量及沼气中甲烷含量计算甲烷总产气量。采用 VELP FIWE6 型纤维素测定仪测定预处理前后麦秸中纤维素、半纤维素和木质素含量。TS 和 VS 的测定按照 American Public Health Association (APHA) 方法进行^[14],以分析厌氧消化前后 TS、VS 及单位 VS 甲烷产量的变化。为了进一步比较预处理的效果,对预处理前后麦秸的提取物进行了分析^[15]。

2 结果与讨论

2.1 总产气量

将未处理与 2%、4% 和 6% 氨化预处理后的麦秸分别进行 60 d 厌氧消化试验,其总产气量为 60 d 日产气量之和。图 1~图 3 分别比较了 3 种进料浓度下,氨化预处理麦秸厌氧消化总产气量的情况。可以看出,氨化预处理后麦秸的总产气量均高于相同进料浓度下未处理麦秸。相同的进料浓度下,增加预处理的含水率能够提高麦秸的总产气量;80% 含水率氨化预处理后麦秸在三种进料浓度下获得了 25.7~29.2 L、35.4~38.1 L 和 40.5~44.9 L 的累积产气量,比未处理麦秸分别提高了 14%~29%、26%~36% 和 23%~37%。

2.2 单位挥发性固体(VS)甲烷产量

作物秸秆厌氧消化产生的沼气是一种可再生的清洁能源,其中 CH₄ 含量及产率是衡量厌氧消化过

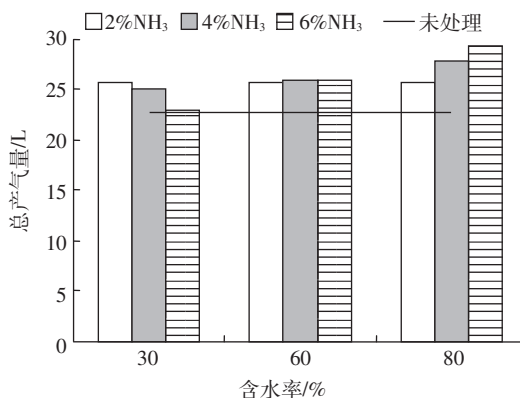


图 1 50 g·L⁻¹ 进料浓度下氨化预处理麦秸总产气量

Figure 1 Total biogas productions of ammonia-pretreated wheat straws at the loading rate of 50 g·L⁻¹

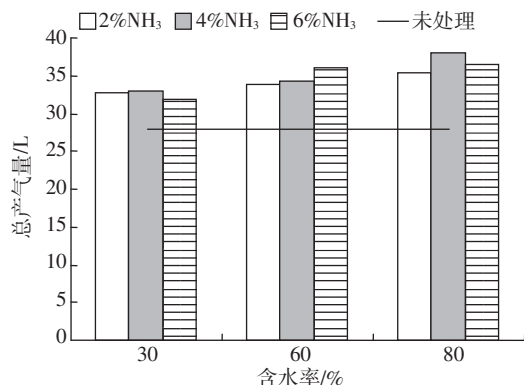
图2 65 g·L⁻¹ 进料浓度下氨化预处理麦秸总产气量

Figure 2 Total biogas productions of ammonia-pretreated wheat straws at the loading rate of 65 g·L⁻¹

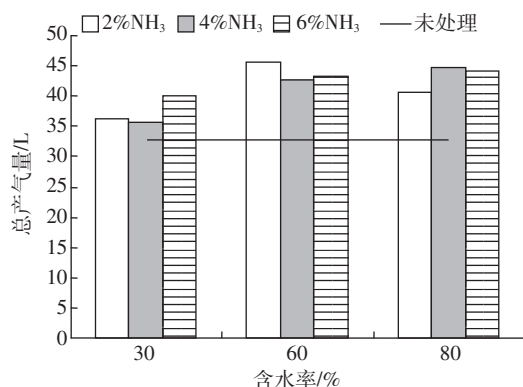
图3 80 g·L⁻¹ 进料浓度下氨化预处理麦秸总产气量

Figure 3 Total biogas productions of ammonia-pretreated wheat straws at the loading rate of 80 g·L⁻¹

程的重要指标^[16]。单位 VS 甲烷产量代表单位浓度的秸秆中的挥发性固体能够获得的甲烷产量。单位 VS 甲烷产量越高,秸秆的可生物降解性能越好,厌氧消化系统内物料的利用率越高^[17]。表 1 比较了 3 种进料浓度下,未处理与氨化预处理麦秸单位 VS 甲烷产量。

从表 1 可以看出,氨化预处理麦秸单位 VS 甲烷产量均高于相同进料浓度下未处理的麦秸,但进料浓度及含水率对单位 VS 甲烷产量的影响变得显著。从整个厌氧消化系统的产能效率分析,80%含水率时氨

化预处理麦秸的总产气量相对较高,且在进料浓度为 80 g·L⁻¹ 时,其总产气量比 65 g·L⁻¹ 进料浓度下提高了 15%~21%,但其单位 VS 甲烷产量反而降低了 4.2%~10.3%。比较氨化预处理后甲烷产量发现,麦秸单位 VS 甲烷产量并未随着氨化预处理试剂添加量的增加而上升。这是因为单纯增加进料浓度表面上提高厌氧消化的总产气量,但由于消化系统内微生物种群的平衡效应,其利用有机物的产能效率是一定的;当进料浓度增加到一定限度时,厌氧消化系统内的平衡性会打破,反而会降低其产气效率。同时,虽然氨化预处理能够提高媒介的可生物降解性能,但当氨的用量较高时,氨的过量存在会抑制产甲烷菌的活性,甚至有可能使其停止生长,进而导致消化系统的产气性能下降。综合分析,80%含水率、4%氨化预处理后麦秸,在进料浓度 65 g·L⁻¹ 时获得最大的产气率,其单位 VS 甲烷产量为 200 mLCH₄·g⁻¹ VS,比相同进料浓度下未处理麦秸提高了 36%。

2.3 总固体(TS)和挥发性固体(VS)降解率的变化

TS 和 VS 的变化可以反映厌氧消化系统内有机物降解的情况,表征有机质沼气转化效率的高低。上文 2.1 和 2.2 的研究结果表明,增加氨化预处理的含水率能够显著提高麦秸的厌氧消化产气效率。图 4 比较了未处理及 80%含水率氨化预处理后的麦秸,在 3 个进料浓度下厌氧消化后 TS 和 VS 降解率。

与未处理麦秸相比,80%含水率氨化预处理后麦秸 TS 和 VS 的降解率分别提高了 12.4%~30.4%和 24.8%~46.2%,但 TS 和 VS 的降解率并未随着氨水添加量及进料浓度的增加而上升。4%氨化预处理后的麦秸在 65 g·L⁻¹ 进料浓度下获得最大的 TS 和 VS 的降解率,分别为 54.3%和 59.1%,这与麦秸单位 VS 甲烷产量的趋势是一致的。究其原因,较高进料浓度下厌氧消化系统内有机物浓度较高、厌氧菌消化能力有限,从而降低了麦秸中总固体和有机物的利用效率,这也是高进料浓度下麦秸 TS 和 VS 降解率参差不齐的原因。因为沼气的产生本身是麦秸中的有机质被厌氧微生物消化利用产生 CH₄ 的过程,所以 TS 和 VS

表 1 未处理及氨化预处理后麦秸单位 VS 甲烷产量(mLCH₄·g⁻¹VS)Table 1 Methane yields of the untreated and ammonia pretreated wheat straws(mLCH₄·g⁻¹VS)

进料浓度	未处理	30%含水率			60%含水率			80%含水率		
		2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃	2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃	2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃
50 g·L ⁻¹	153	161	158	143	165	166	168	173	176	188
65 g·L ⁻¹	157	168	169	161	163	186	186	187	200	189
80 g·L ⁻¹	127	147	159	175	190	183	191	176	191	181

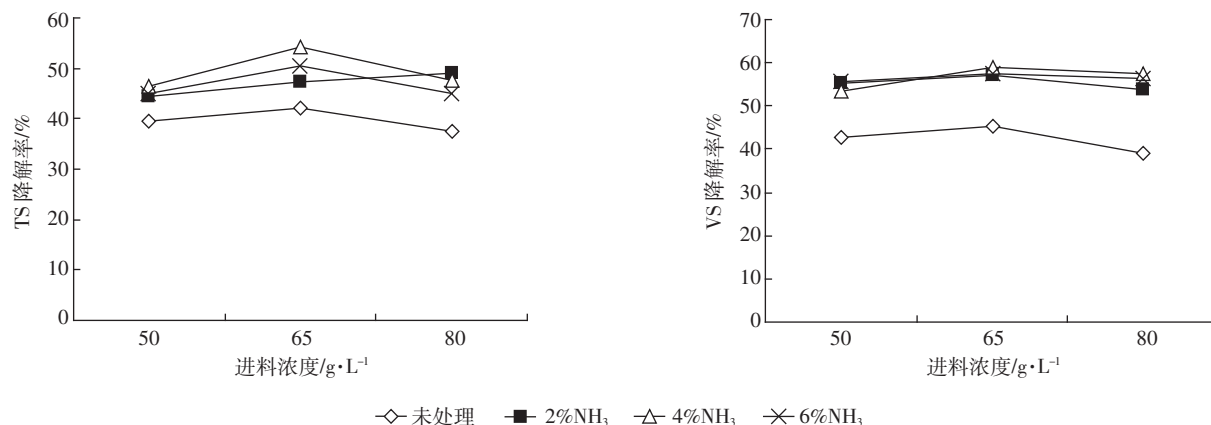


图4 未处理与80%含水率下氨化预处理厌氧消化后麦秸TS和VS降解率

Figure 4 The TS and VS reduction of the untreated and ammonia-pretreated wheat straws at 80% MC after digestion

的降解率的提高也是甲烷产量提高的根本原因。

2.4 消化时间

由于厌氧消化是一个复杂敏感的生物化学反应过程,也是各种微生物菌群相互适应、平衡的过程。如果系统内各种菌群平衡性良好,则整个厌氧消化过程则会反应顺利,厌氧消化效率提高,反应时间缩短^[18]。表2对各种氨化预处理后麦秸厌氧消化时间进行比较。消化时间(Technical digestion time) T_{80} 是指基质进行厌氧消化所产生的累积产气量达到最大产气量的80%所需要的时间,消化时间是评价麦秸厌氧消化性能和厌氧消化效率的另一个重要参数^[19]。本实验中,麦秸连续厌氧消化产气过程持续进行60 d,总产气量为60 d厌氧消化过程所累积的产气量之和,以此来计算 T_{80} 。

从表2可以看出,50 g·L⁻¹进料浓度时,氨化预处理麦秸与未处理麦秸的消化时间均在23 d左右。当进料浓度为65 g·L⁻¹时,80%含水率氨化预处理麦秸的消化时间比未处理麦秸缩短了36%~40%。当进料浓度增加到80 g·L⁻¹时,氨化预处理后麦秸厌氧消化时间参差不齐,尤其是氨水添加量为6%时,3种含水率氨化预处理麦秸的消化时间均有所延长。消化时间的延长,一方面由于复合率的增加导致厌氧消化系统

内有机酸过度积累,另一方面氨水增加过量导致消化系统内游离态氨抑制作用增大,影响了厌氧消化反应体系的正常运行^[20]。80%含水率、4%氨化预处理后的麦秸,在65 g·L⁻¹进料浓度下,其厌氧消化时间为25 d,比未处理麦秸缩短了24%。消化时间的缩短能够降低厌氧消化的周期,提高秸秆的产气效率,在实际工程应用中同样能够降低消化系统的运营成本,带来可观的经济效益。

2.5 氨化预处理后麦秸主要组分变化及其对产气量的影响分析

表3对预处理前后麦秸的主要组分及提取物进行了分析。纤维素、半纤维素和木质素是麦秸的主要组分,也是厌氧微生物生长需要的主要碳源。3种主要组分中,由于半纤维素结构的特殊性,较容易受到氨水的溶解作用,其组分含量变化最明显,降低了26%~42%;其次是纤维素组分,因为纤维素的结晶度结构,其含量仅降低了2%~20%;虽然氨化预处理对其细胞壁结构产生一定的影响,但直接作用于纤维素的效果仍是有限的;对于木质素,其含量相对较低,预处理过程对其组分含量影响不大。半纤维素的去除,使得包裹其中的纤维素被释放出来,使厌氧微生物可以接触到较多的纤维素,从而提高了麦秸的厌氧消化

表2 氨化预处理后麦秸厌氧消化时间比较(d)

Table 2 Digestion time of untreated and ammonia-pretreated wheat straws(d)

进料浓度	未处理	30%含水率			60%含水率			80%含水率		
		2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃	2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃	2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃
50 g·L ⁻¹	23	23	27	23	21	25	23	20	21	22
65 g·L ⁻¹	33	29	28	43	22	38	47	21	25	28
80 g·L ⁻¹	45	48	40	52	24	40	48	24	29	49

表 3 氨化预处理后麦秸主要组分及提取物含量变化

Table 3 Main compositions and extractives of untreated and ammonia-pretreated wheat straw

主要组分	未处理	30%含水率			60%含水率			80%含水率		
		2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃	2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃	2%NH ₃	4%NH ₃	6%NH ₃
纤维素	45.6	44.7	44.3	39.8	42.3	40.5	39.5	40.5	39.5	36.5
半纤维素	35.4	26.2	24.9	22.2	25.3	23.7	22.2	21.5	21.6	20.5
木质素	9.52	10.20	10.20	11.20	9.57	9.88	10.30	9.43	9.02	9.41
冷水提取物	12.5	13.0	13.1	15.2	13.9	15.3	17.3	14.0	15.9	18.0
热水提取物	14.9	16.7	19.2	20.3	16.9	19.3	20.5	19.3	20.7	22.6
1%NaOH 提取物	41.4	42.3	42.9	44.5	42.3	44.5	44.6	44.7	49.1	49.6
苯-醇提取物	1.87	1.73	1.56	1.75	1.73	1.74	1.68	1.45	1.46	1.43

产气性能^[21-22]。

氨化预处理前后麦秸的冷水提取物和热水提取物同样发生了变化。从表 3 可以看出,氨化预处理后麦秸冷水提取物和热水提取物的含量均随着氨含量及含水率增加而提高,增加氨含量及含水率能够释放出秸秆中的易降解成分,将麦秸中的木质纤维素组分转化为小分子化合物,从而提高麦秸的可生物降解性^[23]。1%NaOH 提取物的增加及苯醇提取物含量的降低同样证明了氨化预处理不仅能够破坏麦秸的细胞壁结构,同时还能够去除部分树脂、蜡、脂肪等不利于后续厌氧微生物利用的组分,这些组分变化对于提高麦秸的可生物降解性能和可消化性能都是十分有利的。

3 结论

(1)氨化预处理能够提高麦秸的厌氧消化产气性能。在相同的进料浓度下,增加预处理的含水率能够提高麦秸的总产气量。80%含水率氨化预处理后的麦秸总产气量和单位 VS 产甲烷量均高于较低含水率氨化预处理后的麦秸。其中 80%含水率、4%氨化预处理的麦秸在 $65\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 进料浓度下获得最大 $200\text{ mLCH}_4\cdot\text{g}^{-1}\text{ VS}$ 的甲烷产量,比相同进料浓度下未处理的麦秸提高了 36%。在此条件下,厌氧消化后麦秸 TS 和 VS 的降解率分别为 54.3%和 59.1%,比未处理麦秸提高了 29%和 30%,厌氧消化时间则节省了 24%。

(2)麦秸经氨化预处理后,其纤维素和半纤维素含量均有不同程度的降低,木质素含量变化不大;其冷水提取物、热水提取物及 1%NaOH 提取物含量得到提高,苯-醇提取物得到降低。氨化预处理不仅改变了麦秸的化学组分和结构,提高了原料的生物可及性和利用率,还为后续的厌氧消化过程提供了有效 N 源,降低了预处理及厌氧消化的成本。

参考文献:

- [1] 李景明, 薛 梅. 中国生物质能利用现状与发展前景[J]. 农业科技管理, 2010, 29(2): 1-4, 11.
Li Jing-ming, XUE Mei. Utilization situation and development prospects of biomass energy in China[J]. *Management of Agricultural Science and Technology*, 2010, 29(2): 1-4, 11.
- [2] 林 琳. 从低碳经济角度审视中国生物质能产业的发展[J]. 开放导报, 2009(5): 20-25.
LIN Lin. On development of biomass industry in China from low carbon point of view[J]. *China Opening Herald*, 2009(5): 20-25.
- [3] 韩学风, 张 鹏, 易欣欣. 农作物秸秆的综合利用[J]. 北京农学院学报, 2003, 18(3): 226-230.
HAN Xue-feng, ZHANG Peng, YI Xin-xin. Comprehensive utilization of agricultural staws[J]. *Journal of Beijing Agricultural College*, 2003, 18(3): 226-230.
- [4] Ghost A, Bhattacharyya B C. Biomethanation of white rotted and brown rotted rice straw[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 1999, 20(4): 297-302.
- [5] Scheffer T C, Ellis B C. Natural resistance of wood to microbial deterioration[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 1966, 4(1): 147-168.
- [6] Yang Dong-yan, Li Xiu-jin, Gao Zhi-jian, et al. Improving biogas production of corn stalk through chemical and biological pretreatment: A preliminary comparison study[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2003, 19(5): 209-213.
- [7] Gao Zhi-jian, Li Xiu-jin, Yang Dong-yan, et al. Anaerobic digestion of corn stalk for biogas production: Ambient vs mesophilic temperature[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2003, 19(5): 214-217.
- [8] Luo Qing-min, Li Xiu-jin, Zhu Bai-ning, et al. Anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stalk[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2005, 21(2): 111-116.
- [9] Zheng M X, Li X J, Li L Q, et al. Enhancing anaerobic biogasification of corn stove through wet state NaOH pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 5140-5145.
- [10] He Y F, Pang Y Z, Liu Y P, et al. Physicochemical characteristics of rice straw pretreated with sodium hydroxide in solid state for enhancing biogas production[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(4): 2775-2781.

- [11] Schneider M, Flachowsky G. Studies on ammonia treatment of wheat straw: Effects of level of ammonia, moisture content, treatment time and temperature on straw composition and degradation in the rumen of sheep[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1990, 29(3-4): 251-264.
- [12] Tae Hyun Kim, Jun Seok Kim, Changshin Sunwoo, et al. Pretreatment of corn stove by aqueous ammonia[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90(1): 39-47.
- [13] Zhang R H, Zhang Z Q. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68(3): 235-245.
- [14] APHA-AWWA-WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater", 20th ed, Washington, DC: American Public Health Association, 1998.
- [15] 刘书钗. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
LIU Shu-chai. Analysis and testing of pulp and paper[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [16] 张希衡. 废水厌氧生物处理工程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 216-279.
ZHANG Xi-heng. Anaerobic biological treatment of waste water[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 216-279.
- [17] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙, 等. 生物质能利用原理及技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 72-74.
- YUAN Zhen-hong, WU Chuang-zhi, MA Long-long, et al. Utilization principle and technology of biomass[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005, 72-74.
- [18] Kelleher B P, Leahy J J, Henihan A M, et al. Advances in poultry litter disposal technology: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 83(1): 27-36.
- [19] Palmowski L M, Müller J A. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(3): 156-162.
- [20] 金仁村, 黄冠男, 马 春, 等. 厌氧消化工艺的氨抑制现象[J]. 工业水处理, 2010, 30(4): 9-12.
JIN Ren-cun, HUANG Guan-nan, MA Chun, et al. Ammonia inhibition of anaerobic digestion[J]. *Industrial Water Treatment*, 2010, 30(4): 9-12.
- [21] Pavlostathis S G, Gossett J M. Alkaline treatment of wheat straw for increasing anaerobic digestibility[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1985, 27(3): 334-344.
- [22] Pavlostathis S G, Gossett J M. Modeling alkaline consumption and digestibility improvement from alkaline treatment of wheat straw [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1985, 27(3): 345-354.
- [23] Hendriks A T W M, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(1): 10-18.