甜高粱茎秆乙醇全生命周期分析*

田宜水[1]　李十中[2]　赵立欣[1]　孟海波[1]　霍丽丽[1,3]

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 针对内蒙古地区甜高粱种植和甜高粱茎秆先进固体发酵技术,构建全生命周期分析模型,以及甜高粱种植中化肥、农药等的能量投入数据库,对能耗、温室气体排放及其影响因素进行全生命周期分析。结果表明,能量投入为 34 831 MJ/t,乙醇生产阶段和甜高粱生产阶段是主要能耗阶段;甜高粱乙醇的能量产出为 46 562 MJ/t,净能值为 11 730.97 MJ/t,能量产出投入比为 1.34,CO_2 排放量为 93.23 g/MJ。从能源角度来看,利用甜高粱茎秆生产燃料乙醇是可行的。

关键词: 甜高粱　燃料乙醇　生命周期

中图分类号: S216.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2011)06-0132-06

Life Cycle Assessment on Fuel Ethanol Producing from Sweet Sorghum Stalks

Tian Yishui[1]　Li Shizhong[2]　Zhao Lixin[1]　Meng Haibo[1]　Huo Lili[1,3]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Engineering*, *Beijing* 100125, *China*　2. *Institute of Nuclear and New Energy Technology*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*　3. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract

Aiming at the technologies of sweet sorghum planting and advanced solid state fermentation (ASSF) in Inner Mongolia, a life cycle assessment (LCA) model on energy consumption, greenhouse gas emissions and other relative impact factors was established together with a database of fertilizer, pesticide and other energy inputs. The model showed that the energy input was 34 831 MJ/t and mainly distributed in sweet sorghum planting and ethanol producing phases. The energy output, net energy produced, energy-making efficiency and CO_2 emissions were 46 562 MJ/t, 11 730.97 MJ/t, 1.34 and 93.23 g/MJ, respectively. The results showed sweet sorghum ethanol making was feasible from the view point of energy production.

Key words　Sweet sorghum, Fuel ethanol, Life cycle

引言

燃料乙醇可替代汽油,是可再生能源开发利用的重要方向[1~2]。受制于耕地和粮食的制约[3],我国提出了发展甜高粱茎秆、木薯等非粮生物燃料乙醇。但是,中国车用燃料乙醇产业发展还存在争议,特别是全生命周期的能源消耗和温室气体排放。丁文武、胡志远、李胜、张治山等[4~9]对玉米燃料乙醇开展了全生命周期(life cycle assessment,简称 LCA)分析,张成、胡志远等[10~11]则对木薯乙醇进行了全生命周期分析。柴沁虎[12~14]等也对不同原料的燃料乙醇进行了评价。

甜高粱[15~16]具有光合效率高、生物产量高和抗逆性强、适应性广等特点。李十中等[17]开发了甜高粱茎秆先进固体发酵(advanced solid state fermentation,简称 ASSF)技术,于 2009 年 12 月在内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗开展了工业化试验,并取得了相应效果。本文针对清华大学研究的甜高粱茎秆先进固体发酵 ASSF 技术开展全生命周期分析,构建我国化学、农药等的能量投入数据库,对能

收稿日期: 2010-10-26　修回日期: 2010-12-22

* 农业部引进国际先进农业科学技术项目(2008G2)

作者简介: 田宜水,高级工程师,主要从事农村能源、生物质能技术和设备研究,E-mail: yishuit@yahoo.com

耗、温室气体排放及其影响因素进行分析，为我国能源多元化发展战略提供参考。

1　分析方法

1.1　分析模型

甜高粱茎秆乙醇的生产过程主要包括原料种植、运输、乙醇生产以及运输等环节，从甜高粱种植开始，经过茎秆收集运输、原料预处理（粉碎过程）、燃料乙醇生产和配送，直至消费（燃料乙醇的使用）。能源消耗不仅包括直接消耗，还包括由于使用化肥、农药、蒸汽、热空气等物质引起的间接能源消耗。本系统中没有计入生产化石燃料、农用机械、厂房建设、生产机器设备等的投入以及使用人力的能量消耗。甜高粱乙醇生命周期分析模型见图 1。

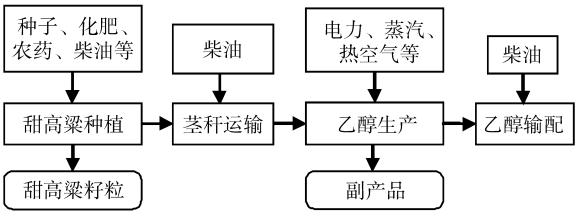

图 1　甜高粱乙醇生命周期分析模型

Fig. 1　LCA model of sweet sorghum ethanol

一般采用净能值和能量产出投入比来分析燃料乙醇生产全生命周期过程中的能量效率[18]。净能值是指单位能量产出减去单位能量投入。能量产出投入比是指单位能量产出比所需要的能量投入。该值大于 1 时，表明该能量产品净能量为正，即产出大于投入，且数值越大，转化效率越高，性能越优。能量效率小于 1 时，表明该能量产品净能量为负，即产出小于投入，从能量角度看不具有可行性。此外，本文还分析了温室气体的排放情况，并与汽油的排放进行了对比。

1.2　数据来源

1.2.1　甜高粱种植

甜高粱种植是指从土壤备耕、播种到原料收获的全过程。包括整地、播种、施肥、除草、浇水、收获等活动，整个过程中的输入变量（即投入或消耗）包括种子、化肥、除草剂、杀虫剂、农机具及拖拉机消耗的柴油（汽油）等，输出为甜高粱籽粒和茎秆。

本文主要依据内蒙古地区盐碱地的甜高粱种植所需种子、化肥、农药、机械用柴油等基础数据。甜高粱底肥以优质的有机肥、氮肥、磷肥为主，以提高茎秆产量和含糖量。盐碱地土壤速效钾含量较高，施用钾肥不利于糖分在茎秆中的积累，一般不施钾肥。甜高粱以条播为主，机械播种有利于出苗整齐。根据不同的播种方式和种子发芽率及土壤墒情确定不同的播种量。甜高粱对多数除草剂比较敏感，除草以人工除草为主。甜高粱进入拔节期以后，干物质积累明显加快，是营养需求高峰期，适时追施氮素肥料可加速甜高粱植株快速生长。高粱蚜虫是危害甜高粱的主要害虫之一，一旦发现应及时喷洒吡虫啉、啶虫脒等。根据对典型地块进行的调查，甜高粱种植过程的主要投入情况为：种子 11.25 kg/hm^2，氮肥（尿素）600 kg/hm^2，磷肥（P_2O_5）105 kg/hm^2，杀虫剂 0.75 kg/hm^2，柴油 67 kg/hm^2。

2006 年，我国氮肥行业生产氮肥 3 440 万 t（折纯 N），其中尿素 4 578.6 万 t（实物量），生产所用的原料：天然气占 21%，煤焦占 64%，其余 15% 为渣油和石脑油[19~20]。2008 年我国磷肥产量 1 285 万 t，其中磷铵、重钙、NPK 复肥、硝酸磷肥等高浓度磷复肥占 73.8%，普钙、钙镁磷肥等低浓度磷复肥占 26.2%，硫酸消费量为 3 812.8 万 t。随着生产技术、管理水平的提高和装备的优化，我国磷肥企业各种能耗水平不断下降，大型企业基本实现了水的封闭循环和零排放[21]。由此可以推算氮肥、磷肥、农药等生产过程中的能耗和温室气体排放数据。种子加工能耗是对种子从收获后到播种前加工过程所消耗的能量，主要包括干燥、预加工、清选、分级、选后处理、称量包装、贮存等工序。由于与玉米种子类似，本文主要参考玉米种子加工能耗的相关数据。化肥和农药的运输距离假设为 100 km，采取公路运输的方式。

甜高粱种植阶段的主要产出为甜高粱籽粒和茎秆。内蒙古地区平均产量为籽粒 3 t/hm^2 和茎秆 60 t/hm^2。在实际的乙醇生产过程中，仅需茎秆，籽粒则作为副产品。但生产这些副产品也消耗了能量，不能将其计入茎秆生产的能量消耗中。所以要对生产茎秆和生产副产品两者消耗的能量进行分配。常用有 5 种分配方法：重量法、能量含量法、产品替换法、市场价值量法、过程能量法。这 5 种方法的计算结果是有差异的。本文使用市场价值量法。目前，甜高粱籽粒的市场价格为 1 100 元/t，茎秆的市场价格为 130 元/t。因此，甜高粱茎秆所消耗的能源将占总能耗的 70%，籽粒则占 30%。

1.2.2　甜高粱运输

甜高粱掐穗去叶后，可将茎秆打捆进行运输，每捆 30 kg 左右。由于甜高粱秸秆高大，长距离运输不便，必须采用专用运输工具或就近运输。机械收割和运输过程中尽量避免折断或压扁茎秆，防止糖分降低。运输甜高粱茎秆的车辆选用农用柴油车，每次平均载货量按 500 kg 计算，车辆空载和实载的运程比为 1∶1，以农村运输典型沙石路面为运输条件，农用柴油车在沙砾路面的基础参数：满载车速

25 km/h,满载耗油率 0.382 kg/(kW·h),空载车速 35 km/h,空载耗油率 0.310 kg/(kW·h),功载比 0.000 72 kW/kg[22]。柴油机车二氧化碳排放系数按 74.037 1 g/MJ 计算。

1.2.3 乙醇生产

乙醇生产过程是将原料加工成无水燃料乙醇(99.5%)过程,包括预处理、发酵、蒸馏脱水等,按 16 t 甜高粱茎秆生产 1 t 燃料乙醇计算。整个单元过程中输入原材料、酵母等各种辅料,以及电、煤、天然气等动力能源。同时生产了燃料乙醇和副产品。本项目所评价的发酵工艺为 ASSF 固态发酵工艺。清华大学在完成固体发酵动力学、固体传质传热基础研究后,基于 10 L、50 L、5 m^3 和 127 m^3 发酵罐试验数据,利用自行开发的 BRD、PRO-Ⅱ和 ZZDH 等模拟软件分别对高粱秆粉碎、固体发酵、连续蒸-精馏、分子筛脱水、发酵糟渣深加工、公用工程 6 个单元进行能量测算,产出 1 t 乙醇的能源消耗量见表 1。其中,发酵糟渣深加工用于加工副产品,如不生产副产品,则需扣除。

表 1 ASSF 甜高粱乙醇生产能源输入

Tab.1 Energy input in sweet sorghum ethanol producing phase

序号	工序	能源类型	单位	数量
1	预处理	电力	kW·h	95
2	固体发酵	电力	kW·h	50
		蒸汽	t	0.2
3	连续蒸-精馏	电力	kW·h	25
		蒸汽	t	2.4
4	分子筛脱水	电力	kW·h	40
		蒸汽	t	1.9
5	高粱秆糟渣深加工	电力	kW·h	143
		热空气	m^3	38 670
6	公用工程	电力	kW·h	20

据中电联统计信息报统计数据[23],2009 年 1~11 月份,全国供电煤耗率为 339 g/(kW·h),全国发电厂累计厂用电率 5.88%,其中水电 0.62%,火电 6.67%。线路损失率 6.07%。原煤燃烧的碳排放系数取自中国实际测定值,为 24.74 t/TJ[24],石油和天然气采用 IPCC(政府间气候变化专门委员会)推荐的缺省值[25],为 19.89、15.30 t/TJ。蒸汽由燃煤蒸汽锅炉生产。我国燃煤工业锅炉量大面广,平均容量小,锅炉容量小于 35 L/h 的约占工业锅炉总量的 98.90%,热效率约 70%[26]。热空气采用燃煤热风炉生产,热效率按 65% 计算[27]。由此可以计算出电力、蒸汽、热空气的能耗数据。

甜高粱乙醇生产阶段的主要产出为燃料乙醇和 CO_2、颗粒燃料等副产品。按照投入 16 t 甜高粱茎秆生产 1 t 燃料乙醇计算,则排放 0.96 t 的 CO_2、1.50 t 颗粒燃料。其中,99.50% 的乙醇低位发热量为 26.80 GJ/t,颗粒燃料低位发热量为 14.65 GJ/t。

1.2.4 乙醇运输

乙醇运输和混配是指将生产好的燃料乙醇运输至目的地市场,在混配站将燃料乙醇和汽油按体积比 1∶9 的比例混配成 E10,并最终运输至加油站的过程。由于目前尚无甜高粱乙醇加入汽油的成功案例,本文将公路运输均设为双程,铁路运输均设为单程[4]。运输能耗则根据中国交通年鉴中的铁路运输主要经济技术指标统计和公路运输行业基本情况统计的数据[28],分别为 8.39×10^{-2} MJ/(t·km)和 2.18 MJ/(t·km)。

2 结果分析

2.1 能源消耗评价

经全生命周期清单分析,我国甜高粱乙醇的能量总投入(考虑副产品)为 34 831 MJ/t。其中,乙醇生产过程的能量投入最高,为 29 046 MJ/t,占总能量投入的 83.4%,是降低甜高粱乙醇能源投入的关键;其次为甜高粱种植过程,为 4 558 MJ/t,占总能量投入的 13.1%。

2.1.1 甜高粱种植阶段能量投入

对内蒙古地区甜高粱种植的能耗统计计算得到甜高粱种植阶段能源投入为 24 325.60 MJ/hm^2,折合甜高粱茎秆 17 093.70 MJ/hm^2。其中,尿素 20 766.95 MJ/hm^2,磷肥(K_2O_5) 321.35 MJ/hm^2,杀虫剂 222.47 MJ/hm^2,种子 0.84 MJ/hm^2,柴油 2 857.68 MJ/hm^2,化肥、农药运输 156.31 MJ/hm^2。氮肥的能量投入最大,约占种植阶段能力投入的 85.4%。因此,在甜高粱种植过程中合理使用化肥,降低氮肥施用量、科学种植是降低甜高粱种植能耗的关键。

2.1.2 甜高粱茎秆运输阶段能量投入

以规模为年产 10 万 t 的甜高粱燃料乙醇生产厂为例,年需要甜高粱茎秆 160 万 t,需要耕地面积 2.67 万 hm^2,运输半径为 16.55 km。则甜高粱茎秆收集和运输阶段的柴油消耗总量为 4 600 t,单位燃料乙醇的柴油消耗量为 28.76 kg/t,折合 1 121 MJ/t。

2.1.3 乙醇生产阶段能量投入

在甜高粱茎秆乙醇生产阶段,能量投入为 29 046 MJ/t。其中,连续蒸-精馏的能耗最高,占总能量投入的 33.26%;高粱秆糟渣深加工、分子筛脱水分别居 2、3 位,分别占总能量投入的 31.38% 和

27.02%。连续蒸-精馏是将乙醇从其他挥发性杂质和成熟醪中分离出来，分子筛脱水是脱水至乙醇含量为 99.5%，均需要消耗大量的能源。

2.1.4　乙醇运输和混配阶段能量投入

假定燃料乙醇平均运输距离为 500 km，采用铁路运输和公路运输相结合的方式，两种运输方式的比例为 6∶4。则甜高粱乙醇运输和混配阶段的能源投入为 441 MJ/t。

2.2　净能值和能量产出投入比

甜高粱乙醇生产阶段的主要产出为燃料乙醇和 CO_2、颗粒燃料等副产品，能量产出为 46 562 MJ/t。其中，乙醇的能量产出为 26 780 MJ/t，副产品的能量产出为 19 782 MJ/t。

如果考虑副产品，则甜高粱乙醇的净能值为 11 731 MJ/t，表明能量产出为正；能量产出投入比是 1.34，从能源角度看项目是可行的。如果不考虑副产品，则甜高粱乙醇的净能值为 1 063 MJ/t，能量产出投入比是 1.06，从能源角度看项目是基本可行的（见表 2）。这说明副产品开发与否对甜高粱乙醇能源投入影响很大，虽然加工副产品增加了能源输入，但整体上净能值和能量产出投入比是增加的。应充分利用甜高粱乙醇生产过程中产生的废渣生产颗粒燃料、饲料等副产品，既可降低生产过程中的能源投入，又增加了经济效益。

表 2　甜高粱乙醇生命周期评价结果

Tab.2　LCA results of sweet sorghum ethanol m/s

参数	考虑副产品	不考虑副产品
能源产出/MJ·t^{-1}	46 562.00	26 780.00
能源投入/MJ·t^{-1}	34 831.03	25 716.78
净能值/MJ·t^{-1}	11 730.97	1 063.22
能量产出投入比	1.34	1.04
温室气体排放量/g·MJ^{-1}	93.23	61.24

2.3　温室气体排放

如果考虑副产品，甜高粱乙醇的 CO_2 排放量为 93.23 g/MJ，略低于汽油的温室气体排放量（98.86 g/MJ）[29]。其中，乙醇生产阶段 CO_2 排放量最高，约占总排放量的 80.3%；其次为甜高粱生产阶段，约占总排放量的 16.0%。如不考虑副产品，甜高粱乙醇的 CO_2 排放量为 61.24 g/MJ，远低于汽油的温室气体排放量。

从温室气体减排的角度来看，如果考虑副产品，则甜高粱乙醇的优势并不明显。但考虑甜高粱乙醇的能源投入主要为煤炭，从我国能源生产结构来看，利用我国丰富的煤炭资源生产甜高粱乙醇以替代我国短缺的石油资源，是基于我国国情的现实选择。

2.4　与其他研究的对比

近几年，我国对燃料乙醇生命周期能量分析的部分结果如表 3 所示。丁文武等[4]认为，玉米燃料乙醇生命周期的净能量值都为负值，能量产投比小于 1；而张治山、戴杜等[5~9]的分析结果表明净能量值为正值，但其在种子、化肥及农药的能量投入采用了国外的数据，而国内的化肥、农业等生产水平与国外相比存在较大不同，这造成了其计算结果与国内的实际情况不符。对于木薯乙醇，虽然相关研究认为其净能值为正，但部分研究在计算过程中有一定的误差，如张成、浦耿强[10~11]等按木薯产量 39 t/hm^2 计算，而实际上中国木薯产量目前仅为 19.5 t/hm^2 左右。柴沁虎[12~14]等也认为对木薯燃料乙醇加工环节能耗的确定存在一定误差，如果将这部分误差予以修正，木薯燃料乙醇技术路线在生命周期化石能消耗与传统的汽油技术路线相比并无优势。由此可以看出，从能源的角度看，甜高粱乙醇具备一定的优势。

表 3　不同研究的乙醇生命周期分析结果

Tab.3　Energy analysis results of ethanol LCA in different studies

	原料	总能源消耗/MJ·t^{-1}	副产品能量产出/MJ·t^{-1}	净能值/MJ·t^{-1}
文献[9]	玉米	29 030	5 320	5 590
文献[6]	玉米	39 932	10 883	1 110
文献[4]	玉米	43 334	7 791	-8 765
文献[11]	木薯	15 899	0	79 544
本研究	甜高粱	34 831	19 782	11 730.97

3　结束语

我国甜高粱乙醇的能源投入为 34 831 MJ/t，乙醇生产阶段的能耗最高，是降低能源消耗的关键，其次为甜高粱生产阶段。甜高粱乙醇的能量产出为 46 562 MJ/t。净能值为 11 730.97 MJ/t，能量产出为正；能量产出投入比是 1.34；甜高粱乙醇的 CO_2 排放量为 93.23 g/MJ，略低于汽油的温室气体排放量。从能源角度来看，采用清华大学开发的甜高粱茎秆先进固体发酵技术生产甜高粱乙醇的项目是可行的，是基于我国国情的现实选择，可作为我国目前燃料乙醇发展的重点。可通过科学合理施肥、改进生产工艺、开发副产品等措施，降低能耗，减少温室气体的排放。

参 考 文 献

1 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, 2007, 23(9): 276~282. (in Chinese)

2 赵勇强. 世界生物燃料产业发展趋势及对中国的启示[J]. 国际石油经济, 2010(2): 15~19.
Zhao Yongqiang. Development trends in the world biofuels industry and their lessons for China[J]. International Petroleum Economics, 2010(2): 15~19. (in Chinese)

3 Tian Y, Zhao L, Meng H, et al. Estimation of un-used land potential for biofuels development in China[J]. Applied Energy, 2009,86(Supp. 1): S77~S85.

4 丁文武,原林,汤晓玉,等. 玉米燃料乙醇生命周期能耗分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(6): 773~779.
Ding Wenwu, Yuan Lin, Tang Xiaoyu, et al. Analysis of net energy production in the corn ethanol life cycle[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(6): 773~779. (in Chinese)

5 张纪鹏,姜慧,霍炜,等. 农作物乙醇燃料的综合效益分析[J]. 农业工程学报,2008,24(2):299~303.
Zhang Jipeng, Jiang Hui, Huo Wei, et al. Analysis of the comprehensive benefits of grain alcohol fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(2):299~303. (in Chinese)

6 戴杜,刘荣厚,浦耿强,等. 中国生物质燃料乙醇项目能量生产效率评估[J]. 农业工程学报,2005,21(11):121~123.
Dai Du, Liu Ronghou, Pu Gengqiang, et al. Evaluation of energy production efficiency of biomass based fuel ethanol program[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(11):121~123. (in Chinese)

7 方芳,于随然,王成焘. 中国玉米燃料乙醇项目经济性评估[J]. 农业工程学报,2004,20(3):239~242.
Fang Fang, Yu Suiran, Wang Chengtao. Economic assessment on corn-based fuel ethanol projects in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(3):239~242. (in Chinese)

8 张艳丽, 高新星, 王爱华,等. 我国生物质燃料乙醇示范工程的全生命周期评价[J]. 可再生能源,2009, 27(6):63~68.
Zhang Yanli, Gao Xinxing, Wang Aihua, et al. Life-cycle assessment for Chinese fuel ethanol demonstration projects[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(6):63~68. (in Chinese)

9 张治山. 玉米燃料乙醇生命周期系统的热力学分析[D]. 天津:天津大学,2005.
Zhang Zhishan. Thermodynamic analysis of corn fuel ethanol life cycle system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)

10 张成. 代用燃料的生命周期 3E 评价及可持续设计[D]. 上海:上海交通大学,2003.
Zhang Cheng. Life cycle 3E assessment and sustainable design of alternative fuel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003. (in Chinese)

11 胡志远, 戴 杜, 浦耿强,等. 木薯燃料乙醇生命周期能源效率评价[J]. 上海交通大学学报,2004,38(10): 1 715~1 718.
Hu Zhiyuan, Dai Du, Pu Gengqiang, et al. Life cycle energy efficiency assessment of cassave-based fuel ethanol[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2004,38(10):1 715~1 718. (in Chinese)

12 柴沁虎,申威,张阿玲,等. 中国木薯产业的供给价格弹性[J]. 清华大学学报:自然科学版,2009,49(6): 913~916.
Chai Qinhu, Shen Wei, Zhang Aling, et al. Chinese cassava industry price supply elasticity[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology, 2009,49(6): 913~916. (in Chinese)

13 申威. 中国未来车用燃料生命周期能源、GHG 排放和成本研究[D]. 北京:清华大学,2007.
Shen Wei. Well-to-wheel analysis on energy use, GHG emissions and cost of vehicle fucls in future China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)

14 柴沁虎. 生物质车用替代能源产业发展研究[D]. 北京:清华大学, 2008.
Chai Qinhu. Research on strategy and development of Chinese biomass alternative fuel, strategy[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)

15 王艳秋,朱翠云,卢峰,等. 甜高粱的用途及其发展前景[J]. 杂粮作物, 2004,24(1): 55~56.

16 赵立欣,张艳丽,沈丰菊. 能源作物甜高粱及其可供应性研究[J]. 可再生能源, 2005(4): 37~40.
Zhao Lixin, Zhang Yanli, Shen Fengju. A study on sweet sorghum and its availability[J]. Renewable Energy, 2005(4): 37~40. (in Chinese)

17 韩冰,王莉,李十中,等. 先进固体发酵技术 (ASSF) 生产甜高粱乙醇[J]. 生物工程学报,2010,26(7): 966~973.
Han Bing, Wang Li, Li Shizhong, et al. Ethanol production from sweet sorghum stalks by advanced solid state fermentation (ASSF) technology[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010,26(7): 966~973. (in Chinese)

18 张阿玲,申威,韩维建,等. 车用替代燃料生命周期分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
19 於子方. 氮肥行业节能技术综述[J]. 氮肥技术,2007,28(5):1~6.
20 王小伍,华贲. 对我国氮肥工业的全方位评价[J]. 现代化工,2005,24(4):5~8.
Wang Xiaowu, Hua Ben. Global scope assessment of China's nitrogenous fertilizer industry[J]. Modern Chemical Industry, 2005,24(4):5~8. (in Chinese)
21 齐焉,武雪梅. 2008 年我国硫酸磷肥生产概述[J]. 硫酸工业,2009(2):1~5.
Qi Yan, Wu Xuemei. China's sulphuric acid and phosphate fertilizer production in 2008[J]. Sulphuric Acid Industry, 2009(2):1~5. (in Chinese)
22 陈丽能,林鸿,徐展峰,等. 农村运输机械耗油量数学模型的研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2003, 29(2):185~187.
Chen Lineng, Lin Hong, Xu Zhanfeng, et al. Research on the math models of the combustion oil consumption of the farm transport machineries[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University: Agric. & Life Sci., 2003, 29(2): 185~187. (in Chinese)
23 狄向华,聂祚仁,左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. 中国环境科学,2005,25(5):632~635.
Di Xianghua, Nie Zuoren, Zuo Tieyong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. China Environmental Science, 2005,25(5) 632~635. (in Chinese)
24 中国电业企业联合会. 2009 年全国电力工业统计年报数据[R].
25 IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Intergovermental Panel on Climate Change, 2006.
26 何心良. 我国工业锅炉使用现状与节能减排对策探讨[J]. 工业锅炉, 2010(3):1~8.
He Xinliang. The present situations of IB in use and strategy of energy-conservation and emission-reduction in China[J]. Industrial Boiler, 2010(3):1~8. (in Chinese)
27 朱文学,张仲欣,刘建学,等. 我国干燥用热源的研究和应用现状分析[J]. 粮食储藏,2005(4): 40~46.
Zhu Wenxue, Zhang Zhongxin, Liu Jianxue, et al. Analysis on current situation of research and application of drying source in China[J]. Grain Storage, 2005(4): 40~46. (in Chinese)
28 中国交通年鉴编辑部. 中国交通年鉴 2009[M]. 北京:中国交通年鉴社,2009.
29 欧训民,张希良. 中国终端能源的全生命周期化石能耗及碳强度分析[J]. 中国软科学,2009(增刊 2): 207~214.
Ou Xunmin, Zhang Xiliang. Fossil energy consumption and GHG emissions of final energy by LCA in China[J]. China Soft Science, 2009(Supp.2): 207~214. (in Chinese)
30 吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报,2009,40(1):91~99.
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqiu, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):91~99. (in Chinese)

(上接第 131 页)

10 Terashima M, Goel R, Komatsu K, et al. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters[J]. Bioresource Technology, 2009,100(7):2 228~2 233.
11 Saeed S, Ein-Mozaffari F,Simant R U. Using computational fluid dynamics modeling and ultras onic doppler velocimetry to study pulp suspension mixing[J]. Department of Chemical Engineering,2007,46(7):2 172~2 179.
12 Hui L K, Benningtona C P J, Dumontb G A. Cavern formation in pulp suspensions using side-entering axial-flowimpellers [J]. Chemical Engineering Science,2009,64(3):509~519.
13 帕坦卡,传热与流体流动的数值计算[M]. 北京:科学出版社,1984.
14 Ranade V V, Bourne J R,Joshi J B. Fluid mechanics and blendingin agitated tanks[J]. Chem. Eng. Sci.,1991,46(8): 1 883~1 893.
15 毕峻玮,朱洪光,石惠娴,等. 沼气池搅拌的 CFD 模拟及温度场验证[J]. 农业工程学报,2010,26(10):283~289.
Bi Junwei,Zhu Hongguang,Shi Huixian,et al. CFD simulation and temperature field validation of biogas digester mixing[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(10):283~289. (in Chinese)
16 蔡晓君,吴立志. 侧插式搅拌器结构探讨[J]. 石油化工设备,2001,30(增刊 1):45~46.