

工业生物技术

广西中粮 20 万吨/年木薯燃料乙醇净能量分析

岳国君¹, 孙振江^{1,2}, 沈乃东^{1,3}

1 国家能源生物液体燃料研发(实验)中心, 北京 100020

2 广西中粮生物质能源有限公司, 广西 北海 536100

3 中粮营养健康研究院, 北京 102209

岳国君, 孙振江, 沈乃东. 广西中粮 20 万吨/年木薯燃料乙醇净能量分析. 生物工程学报, 2015, 31(2): 242-250.

Yue GJ, Sun ZJ, Shen ND. Net energy analysis for annual 200 000 ton cassava ethanol production at Guangxi COFCO. Chin J Biotech, 2015, 31(2): 242-250.

摘要: 广西中粮 20 万吨/年木薯燃料乙醇装置建成后经历多次工艺改造, 为了评估广西装置的能量投入/产出, 利用国内已有的全生命周期模型进行了净能量分析。计算结果表明, 广西装置的净能量为 9.56 MJ/L 乙醇。其中乙醇转化环节的能量投入占总能量投入的 51.3%, 而其中精馏工序仅蒸汽消耗即占乙醇转化总能耗的 61.5%。副产品提供的能量可补偿 5.03 MJ/L 乙醇。因此, 原料的综合利用是广西装置提高能源利用效率的重要措施, 精馏工序的节能改造对净能量具有重要影响。最后展望了木薯燃料乙醇的发展前景。

关键词: 木薯乙醇, 全生命周期, 净能量分析

Net energy analysis for annual 200 000 ton cassava ethanol production at Guangxi COFCO

Guojun Yue¹, Zhenjiang Sun^{1,2}, and Naidong Shen^{1,3}

1 National Energy Research Center of Liquid Biofuels, Beijing 100020, China

2 Guangxi COFCO Bio-Energy Co., Ltd., Beihai 536100, Guangxi, China

3 COFCO Nutrition & Health Research Institute, Beijing 102209, China

Abstract: Guangxi COFCO innovates its annual 200 000 ton cassava ethanol production in recent years. To evaluate the

Received: July 3, 2014; **Accepted:** November 26, 2014

Supported by: National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (Nos. 2012AA022304, 2013AA050702).

Corresponding author: Naidong Shen. Tel: +86-10-56989569; Fax: +86-10-56989555; E-mail: shennnd@cofco.com

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (Nos. 2012AA022304, 2013AA050702) 资助。

网络出版时间: 2014-12-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1998.Q.20141223.0912.001.html>

energy input/output of the production process, we used the domestic life cycle model. The calculation results show that the net energy value was 9.56 MJ/L ethanol. Energy input for ethanol production was 51.3% of the total. 61.5% of energy input for ethanol production was used for steam input in ethanol distillation. Energy produced from by-product was 5.03 MJ/L ethanol. Hence, efficient use of raw materials is an important measure to improve the energy efficiency in Guangxi COFCO and energy compensation from byproducts has key impact on the net energy saving.

Keywords: cassava ethanol, life cycle, net energy analysis

发展液体替代交通运输燃料是解决化石能源短缺问题的重要途径, 在各种液体替代运输燃料中, 燃料乙醇作为最成功的品种, 已经在世界范围内形成年产量超过 7 000 万 t 的能源产业。随着燃料乙醇产业的快速发展, 粮食原料成为制约燃料乙醇产业进一步发展的瓶颈, 发展非粮燃料乙醇已成为世界范围内的趋势。中粮集团于 2006 年在广西北海市建设广西中粮生物质能源有限公司 20 万 t/年木薯燃料乙醇示范装置 (以下简称广西装置)。广西装置设计年产燃料乙醇 20 万 t, 沼气 2 970 万 m³ (标况下), 木薯渣 10 万 t, 液体 CO₂ 1.5 万 t, 目前是世界上规模最大的非粮燃料乙醇装置。

截至 2014 年 3 月底, 广西装置已累计生产燃料乙醇 81 万 t, 可配制车用乙醇汽油 730 万 t, 累计减排温室气体 41 万 t^[1], 产生了预期的经济、社会和生态效益。经过生产考核的这套成套技术将对于我国正在推进的薯类、甜高粱乃至木质纤维素等非粮燃料乙醇的发展起到积极的推动作用。

1 工艺概述

广西装置建成后经历了多次技术改造, 2014 年工艺流程如图 1 所示。广西装置使用的原料主要为干木薯, 木薯收获期也使用新鲜木薯。广西装置采用了干木薯浓醪除沙、高温喷射与低能阶换热集成工艺、木薯同步糖化发酵

与浓醪发酵、三效热耦合精馏等技术, 并通过废液、废渣、废气综合利用, 实现了清洁生产。

1.1 预处理

预处理采用自主研发的干木薯浓醪除沙技术。干木薯经过预粉碎后过筛, 筛下物和拌料水混合成固含量较低的粉浆后进入除沙器, 利用低粘度稀浆更容易沉降脱沙的特性脱除沙子等杂物, 之后和粉碎机送出的木薯粉混合, 制成满足液化要求的高浓度粉浆。在采用鲜木薯时, 向粉浆中添加干木薯粉来提高粉浆的固含量。投产初期, 采用 4 条处理线二级粉碎, 处理能力为 60–80 t 干木薯/h。2012 年将原有的 4 条线拆分为 8 条线, 经过改造, 能耗保持不变, 但处理能力提高至 80–100 t 干木薯/h。

1.2 同步糖化发酵

液化采用高温喷射与低能阶换热集成工艺。二次加酶降低了液化过程中酶制剂的消耗。液化醪液经过两级换热降温后加入硫酸调 pH 并加入糖化酶, 在发酵罐进行同步糖化发酵。

1.3 精馏

精馏工序采用三效热耦合精馏工艺技术。发酵液经过发酵醪池后依次进入粗塔及两个精塔。二精塔塔顶蒸汽去分子筛, 分子筛脱水采用变压吸附脱水工艺, 脱水后出无水乙醇。粗塔及二精塔塔底的废醪进入分离干燥工序及污水处理的全槽厌氧工序。

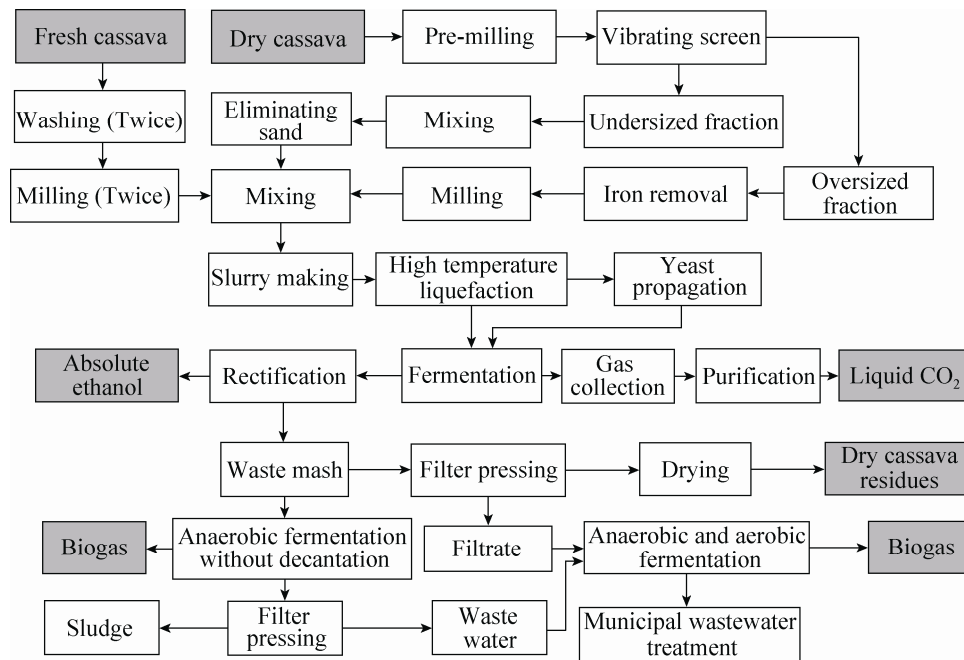


图 1 广西装置木薯燃料乙醇工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cassava fuel ethanol production process in Guangxi COFCO.

1.4 分离干燥

精馏排放的醪液在分离干燥工序经过蛋白絮凝后通过板框过滤机进行固液分离操作。湿糟入滚筒干燥后作为饲料出售或作为锅炉燃料，清液进入污水处理。

1.5 污水处理

分离干燥工序的清液进入污水一期工程进行处理，经过 IC 厌氧反应器产沼气，废水先后经过厌氧、好氧等生化处理，经过深度处理后化学需氧量 (COD) 达到酒精行业《污水综合排放标准》一级排放标准 100 mg/L 后，进入城市污水处理管网。

2010 年建成的全糟厌氧发酵为污水处理二期工段，醪液进入全糟厌氧反应产生沼气，料液经过压滤后的污水进入一期污水处理，污泥

进行掺烧或做有机肥外售。二期污水处理配有 5 个 5 600 m³ 厌氧反应罐，产沼气水平为 300 Nm³/t 乙醇 (55% 甲烷含量)。

2 基础数据

2.1 净能量模型

文献报道，评估燃料乙醇的能量效率可以以净能量 (Net energy value, NEV) 为指标，采用全生命周期评价的方法对燃料乙醇的能量投入/产出进行分析^[2-8]。净能量是指燃料乙醇提供的能量减去生命周期的化石能量输入的剩余能量与副产品替代的能量之和，本文采用国内提出的净能量分析模型^[2]进行核算。按该模型，燃料乙醇生产全生命周期的能量分析涉及到原料生产、原料运输、乙醇转化、乙醇运输和燃料使用等环节。

该模型用于计算玉米燃料乙醇生命周期的净能量，玉米乙醇的能量产出只有乙醇燃烧过程，而木薯乙醇的部分副产品如木薯渣及沼气皆可直接燃烧供能，本文采用的模型简式如式(1)。

$$NEV=BE_1-(FE_1+FE_2+FE_3+FE_4-BE_2) \quad (1)$$

式中， BE_1 为乙醇燃烧热能， BE_2 为沼气及木薯渣干糟的燃烧热能之和， FE_1 为木薯生产过程能耗， FE_2 为运输木薯消耗的能量， FE_3 为乙醇转化过程消耗的能量， FE_4 为运输燃料乙醇消耗的能量。

2.2 原料生产环节

木薯生产过程的能量输入包括种子、化肥、农药、燃料（柴油）和劳动力等，在不同的木薯种植区域，各输入项的能量强度相差很大。文献[9]中对广西不同的木薯种植模型进行了详细的分析，本文木薯生产的能耗采用其报道的结果。广西装置收集的木薯以山地种植的木薯为主，根据文献中的计算，生产环节的能耗为 5.41 MJ/L 乙醇（6.85 MJ/kg 乙醇）。

2.3 原料运输环节

$$FE_2 = \frac{D_1 \times TE_1 \times H_1}{x} \quad (2)$$

木薯运输环节的能耗按式 (2) 计算，式中

D_1 为木薯的运输距离，考虑广西装置实际原料运输情况，设定为 250 km； TE_1 是运输燃料（柴油）的消耗强度，参考文献[10]中的数据，为 7.45 L 柴油/(100 t km)； H_1 是运输燃料（柴油）的能量强度，按文献[11]中的数据，为 42.7 MJ/kg (35.87 MJ/L)； x 为乙醇转化率，根据广西装置实际情况，为 1 t 乙醇消耗 2.918 t 干木薯，由于工厂鲜木薯用量较小，全部以干木薯进行计算。

2.4 乙醇转化环节

乙醇转化环节是本文介绍的内容，该环节采用源自广西装置的生产数据。通过对广西装置的原辅料消耗、各项损耗、主副产品的产出核算，形成的物料平衡简图如图 2 所示。图 2 以生产 1 t 燃料乙醇为基准，表示出装置的输入和输出物料量。输入的物料除木薯外，还包括新鲜水、辅料及蒸汽，酶、尿素、硫酸等辅料的用量占的比例很小，因此本文全生命周期评价边界不涉及辅料的生产环节。损耗包括杂质（沙、粉尘）、喷射液化的排气、精馏得到的杂醇油和污水处理的污泥。输出物料除产品乙醇外，还有沼气、二氧化碳、木薯渣等副产品，以及外排的废水。其中二氧化碳有 0.075 t 作液体二氧化碳出售，剩余排放处理。

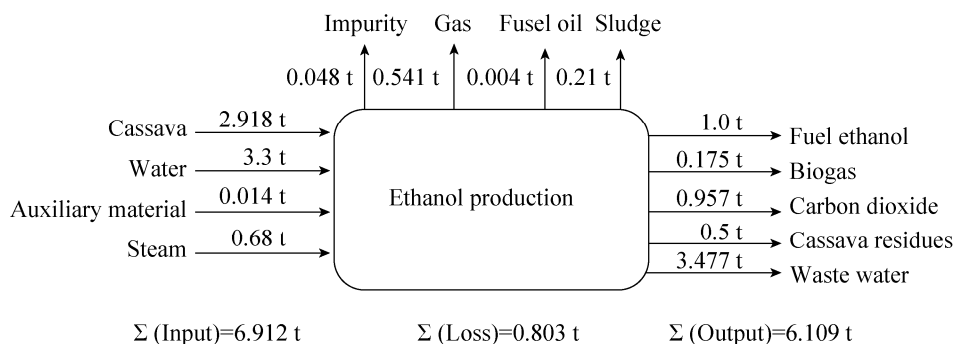


图 2 乙醇生产环节物料平衡简图

Fig. 2 Diagram of material balance of ethanol production.

乙醇转化环节的计算公式如式 (3) 所示, 式中, E_i 是乙醇转化过程中投入的各能量的消耗量, EI_i 是各种形式能量的能量强度。

$$FE_3 = \sum_i E_i \times EI_i \quad (3)$$

乙醇转化环节的能量投入主要为电、蒸汽和水的消耗, 采用广西装置 2013 年 11 月-2014 年 3 月间的统计数据, 如表 1 所示。电、蒸汽、水的能量强度均按文献[11]折标煤, 折标煤系数分别为 0.1229 kg ce/(kw·h)、0.1286 kg ce/kg、0.086 kg ce/t, 折标煤后能量强度分别为 54.94 kg 标煤/t 乙醇、314.04 kg 标煤/t 乙醇、0.28 kg 标煤/t 乙醇, 计算得转化环节综合能耗为 369.26 kg 标煤/t 乙醇。标煤的热值按文献[11]为 29.31 MJ/kg。

2.5 乙醇运输环节

$$FE_4 = D_2 \times TE_1 \times H_1 \quad (4)$$

乙醇运输环节的能耗按式 (4) 计算, 与式 (2) 相似, 式中 D_2 为乙醇的运输距离, 广西装

表 1 乙醇转化单元电、蒸汽、水消耗

Table 1 Electricity, steam and water consumption of ethanol production

Item	Electricity (kw·h/ton ethanol)	Steam (ton/ton ethanol)	Water (ton/ton ethanol)
Milling	52	—	0.069
Liquefaction and fermentation	55	0.68	2.41
Rectification	45	1.76	0.82
Separation and drying	25	—	—
Utilities	270	—	—
Total consumption	447	2.44	3.3
Standard coal equivalent (kg/ton ethanol)	54.94	314.04	0.28

表 2 能量产出部分基础数据

Table 2 Data of energy output

Item	Data
Caloric value of ethanol (MJ/kg)	26.84 ^[12]
Caloric value of biogas (MJ/m ³)	21.5 ^[13]
Caloric value of cassava residues (MJ/kg)	4.75
Biogas yield (m ³ /ton ethanol)	186
Cassava residues yield (ton/ton ethanol)	0.5

置实际销售半径平均为 550 km; TE_1 及 H_1 在式 (2) 中给出。

2.6 能量产出部分

能量产出的主产品乙醇的热值采用文献[12]数据。文献[12]报道指出, 燃料乙醇副产品的开发对全生命周期的净能量有关键影响, 副产品沼气及木薯渣干糟也计入能量产出部分 (二氧化碳忽略不计), 计算公式如式 (5) 所示, 式中, OE_i 是产出的副产品的能量消耗量, OEI_i 是各种形式能量的能量强度。沼气按甲烷含量 60% 计算热值, 热值数据参考文献[13]。广西装置的木薯渣热值, 参照国家标准《煤的发热量测定方法》(GB/T 213-2008) 进行测定, 测定结果为 1 135 kcal/kg (4.75 MJ/kg)。

$$BE_2 = \sum_i OE_i \times OEI_i \quad (5)$$

3 结果与讨论

3.1 计算结果

全生命周期过程的能量计算结果如表 3 及图 3 所示。能量投入过程中, 总投入为 16.65 MJ/L 乙醇, 其中木薯生产占 32.5%, 而乙醇转化过程占到 51.3%, 木薯及乙醇运输环节投入的能量为 16.2%。产出的能量包括乙醇燃烧产出的能量、沼气及木薯渣干糟燃烧产出的能量, 总产出为

26.21 MJ/L 乙醇。根据公式 (1) 计算得到净能量数据为 9.56 MJ/L 乙醇, 在已报道^[4,6,9,14-16]的结果中居于较高水平 (4.79–10.22 MJ/L 乙醇)。

Nguyen 等^[4]报道的泰国木薯燃料乙醇的净能量值为 10.22 MJ/L 乙醇。本文与其差异主要源自木薯生产、乙醇转化、能量产出等环节, 以木薯生产环节为例, 本文采用文献报道的该环节能耗为 5.41 MJ/L 乙醇, Nguyen 等报道的泰国数据为 2.82 MJ/L 乙醇。

3.2 讨论

多家单位曾报道过广西装置投产后的物料消耗、能量消耗、环境监测指标、生产技术指标等数据^[14,17-20]。经过近年来的多次改造, 广西装置的有关指标又取得了新的进步, 前后对比情况如表 4 所示。由表 4 可知, 乙醇转化环节能耗显著降低, 综合能耗由 396 kg 标煤/t 乙醇降至 369.3 kg 标煤/t 乙醇。广西装置近年来在物料消耗、能耗水平降低方面采取了多种技术提升及改造举措。

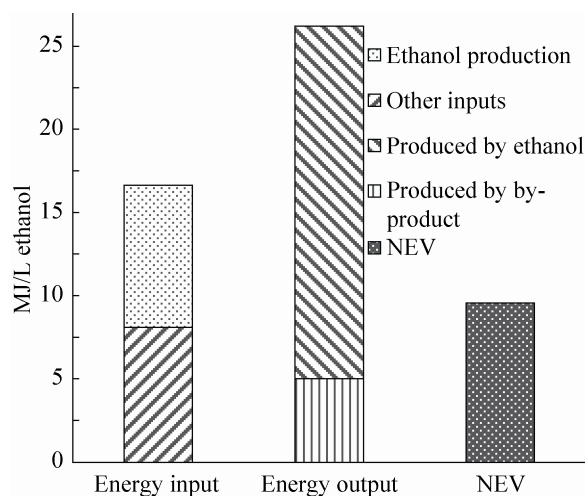


图 3 能量投入/产出简图

Fig. 3 Diagram of energy input/output.

表 3 净能量计算数据表

Table 3 Calculation of net energy

Item	Energy (MJ/kg ethanol)	Energy (MJ/L ethanol)
Raw materials production	6.85	5.41
Raw materials transportation	1.95	1.54
Ethanol production	10.82	8.54
<i>Electricity in ethanol production</i>	<i>1.61</i>	<i>1.27</i>
<i>Steam in ethanol production</i>	<i>9.20</i>	<i>7.27</i>
<i>Water in ethanol production</i>	<i>0.008 3</i>	<i>0.006 6</i>
Ethanol transportation	1.47	1.16
Total inputs	21.09	16.65
Energy produced by ethanol	26.84	21.18
Energy produced by biogas	3.99	3.16
Energy produced by cassava residues	2.38	1.87
Total outputs	33.21	26.21
NEV	12.12	9.56

Italics represents detailed energy inputs in ethanol conversion.

表 4 广西中粮近期技术指标与往年对比

Table 4 Recent and previous technical indicators in Guangxi COFCO

Item	Recent data	Data of initial period
Water consumption of main process (ton/ton ethanol)	3.3	<5.5 ^[20-22]
Steam consumption (ton/ton ethanol)	2.44	<2.5 ^[20-21]
Steam consumption in liquefaction (ton/ton ethanol)	0.68	≤0.8 ^[22]
Comprehensive energy consumption (kg standard coal/ton ethanol)	369.3	396 ^[23]

1) 副产物利用: 副产品带来的节能效果不容忽视, 广西装置沼气和木薯渣干糟直接燃烧提供的能量产出达 5.03 MJ/L 乙醇, 约占净能量

值的 52.6%。其中沼气提供的能量较高, 约占净能量值的 33%。由此可见, 对木薯燃料乙醇而言, 做好木薯燃料乙醇原料的综合利用是提高能源利用效率的重要措施。

2) 精馏蒸汽消耗: 根据净能量计算结果, 蒸汽消耗占乙醇转化总能耗的 85%, 精馏工序的蒸汽消耗占到总蒸汽消耗的 72.36%, 从能量角度看, 精馏工序的节能改造具有关键的影响。广西装置 2008 年建的一期精馏设备采用三效热耦合精馏工艺, 蒸汽消耗量为 2.04 t 蒸汽/t 乙醇。2010 年 10 月完成的二期精馏蒸汽消耗为 1.9 t 蒸汽/t 乙醇。近年来在解决发酵醪液不溶物造成的换热设备结垢及堵塞等方面取得成效, 蒸汽消耗进一步降低。目前蒸汽消耗可降至 1.6–1.7 t 蒸汽/t 乙醇。

3) 水消耗: 在计算中, 水的消耗对于净能量评估影响较小, 但新鲜水的消耗量几乎和净能量具有相提并论的意义。广西装置建厂初期, 主工艺水耗为 5.5 t/t 乙醇。装置投产后在耗水较大的粉碎单元采用了多种工艺水回用。如液化真空泵水、闪蒸冷凝水、精馏釜水、废液罐废水等均用于拌料。另外在鲜薯原料预处理单元, 采用自主开发的洗水套用工艺, 既节约了工厂用水也解决了含微量氢氰酸的木薯清洗水不适于排放至污水处理单元的难题。经过这几年的节水改造, 主工艺水耗已降至 3.3 t/t 乙醇。除主工艺水外, 全公司水耗也由近 30 t/t 乙醇低至 12.5 t/t 乙醇。节水还采取中水回用等途径, 在耗水较大的工序, 如粉碎拌料工序, 通过中水回用, 水耗低至 0.069 t/t 乙醇。精馏工序醪液的稀释水也采用中水及清液。其他如分离干燥工序的除尘水、污水处理好氧处理环节的喷淋用水则全部改为中水。通过上述多种举措, 广西装置

的主工艺水耗比 2008 年投产初期降低了 40%。

4 展望

近年来, 国内木薯燃料乙醇发展很快。至 2014 年 2 月, 国家发改委已批复广东中能酒精有限公司 15 万 t/年、中国石化东乡 10 万 t/年、浙江燃料乙醇有限公司 30 万 t/年木薯及海南椰岛 (集团) 股份有限公司 10 万 t/年木薯燃料乙醇项目, 未来几年新增产能总计约 65 万 t/年。

在国外, 泰国、越南等主要木薯生产国也在积极利用本地资源发展燃料乙醇生产。据文献[24]报道, 至 2011 年底, 泰国 19 家在运行的乙醇厂总产能约 81 万 t/年。另外, 拿到生产牌照未开工或未建设的工厂总生产潜能约 248 万 t/年, 其中木薯燃料乙醇厂约占 80%。

国内外木薯燃料乙醇的发展显现了木薯原料的优越性。广西中粮作为国内第一家大型木薯燃料乙醇企业, 应及时吸纳新建装置实施新技术的成果, 继续研究节能降耗的新举措, 优化生产工艺, 不断丰富提升国内自有技术水平。

展望未来国际技术市场, 对成套木薯燃料乙醇技术具有潜在的需求。在广西中粮形成的我国成套木薯燃料乙醇技术已具有一定的竞争力, 继续提升技术水平对于成套技术出口也有重要意义。

REFERENCES

- [1] Kang LP, Earley R, An F, et al. U.S. renewable fuel standard implementation mechanism and market tracking. *Chin J Biotech*, 2013, 29(3): 265–273 (in Chinese).
康利平, Earley R, 安锋, 等. 美国可再生燃料标准实施机制与市场跟踪. *生物工程学报*, 2013, 29(3): 265–273.

- [2] Zhang ZS, Yuan XG. Net energy analysis of corn fuel ethanol life cycle. *Environ Sci*, 2006, 27(3): 437–441 (in Chinese).
张治山, 袁希钢. 玉米燃料乙醇生命周期净能量分析. *环境科学*, 2006, 27(3): 437–441.
- [3] Hu ZY, Dai D, Pu GQ, et al. Life cycle energy efficiency assessment of cassava-based fuel ethanol. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2004, 38(10): 1715–1718 (in Chinese).
胡志远, 戴杜, 蒲耿强, 等. 木薯燃料乙醇生命周期能量效率评价. *上海交通大学学报*, 2004, 38(10): 1715–1718.
- [4] Nguyen TLT, Gheewala SH, Garivait S. Full chain energy analysis of fuel ethanol from cassava in Thailand. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(11): 4135–4142.
- [5] Swana J, Yang Y, Behnam M, et al. An analysis of net energy production and feedstock availability for biobutanol and bioethanol. *Bioresour Technol*, 2011, 102(2): 2112–2117.
- [6] Dai D, Hu ZJ, Pu GQ, et al. Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China. *Energ Convers Manage*, 2006, 47(13/14): 1686–1699.
- [7] Yu SR, Tao J. Simulation-based life cycle assessment of energy efficiency of biomass-based ethanol fuel from different feedstocks in China. *Energy*, 2009, 34(4): 476–484.
- [8] Papong S, Malakul P. Life-cycle energy and environmental analysis of bioethanol production from cassava in Thailand. *Bioresour Technol*, 2010, 101(1): S112–S118.
- [9] Liu BB, Wang F, Zhang B, et al. Energy balance and GHG emissions of cassava-based fuel ethanol using different planting modes in China. *Energ Policy*, 2013, 56: 210–220.
- [10] Ou XM, Zhang XL. Life-cycle analysis of automotive energy pathways in China. Beijing: Tsinghua University Press, 2011 (in Chinese).
欧训民, 张希良. 中国车用能源技术路线全生命周期分析. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [11] GB/T 2589-2008, General principles for calculation of the comprehensive energy consumption[S] (in Chinese).
GB/T 2589-2008, 综合能耗计算通则[S].
- [12] Dai D, Liu RH, Pu GQ, et al. Evaluation of energy production efficiency of biomass based fuel ethanol program. *Transact CSAE*, 2005, 21(11): 121–123 (in Chinese).
戴杜, 刘荣厚, 蒲耿强, 等. 中国生物质燃料乙醇项目能量生产效率评估. *农业工程学报*, 2005, 21(11): 121–123.
- [13] Liu BQ, Hong H, Wang LG. Introduction to Energy Engineering. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese).
刘柏谦, 洪慧, 王立刚. 能源工程概论. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [14] Zhang YL, Gao XX, Wang AH, et al. Life-cycle assessment for Chinese fuel ethanol demonstration projects. *Renew Energ Resour*, 2009, 27(6): 63–68 (in Chinese).
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. *可再生能源*, 2009, 27(6): 63–68.
- [15] Hu ZY, Fang F, Ben DF, et al. Net energy, CO₂ emission, and life-cycle cost assessment of cassava-based ethanol as an alternative automotive fuel in China. *Appl Energy*, 2004, 78(3): 247–256.
- [16] Yu SR, Tao J. Energy efficiency assessment by life cycle simulation of cassava-based fuel ethanol for automotive use in Chinese Guangxi context. *Energy*, 2009, 34(1): 22–31.
- [17] Huang RB, Chen D, Wang QY, et al. Fuel ethanol production from cassava feedstock. *Chin J Biotech*, 2010, 26(7): 888–891 (in Chinese).
黄日波, 陈东, 王青艳, 等. 木薯原料生产燃料乙醇. *生物工程学报*, 2010, 26(7): 888–891.
- [18] Huang JM, Li HH, Wang HJ, et al. Development status and technical requirements of non-grains biomass energy industry in Guangxi. *Liquor-Making Sci Technol*, 2012, (9): 104–106 (in Chinese).
黄纪民, 李海洪, 王何健, 等. 广西非粮生物质

- 能源产业发展现状及近期技术需求. 酿酒科技, 2012, (9): 104-106.
- [19] He H, Hu XT, Qi PL, et al. Status and prospects of the 1.5 generation bioethanol industry in China. *Chem Ind Eng Prog*, 2012, 31(S1): 1-6 (in Chinese).
何皓, 胡徐腾, 齐泮仑, 等. 中国第 1.5 代生物燃料乙醇产业发展现状及展望. *化工进展*, 2012, 31(S1): 1-6.
- [20] Zhao SF. Net energy value analysis and environmental impact assessment for cassava fuel ethanol: Based on cassava fuel ethanol project annually producing 200 000 tons in Guangxi. *Ecological Economy*, 2010, (2): 235-238 (in Chinese).
赵淑芳. 木薯燃料乙醇的净能量分析与环境影响评价——基于广西 20 万吨木薯燃料乙醇项目的分析. *生态经济: 学术版*, 2010, (2): 235-238.
- [21] Liu SH, Liu XF. Technological development of non-grain based fuel ethanol production. *Liquor Making*, 2010, 37(2): 9-11 (in Chinese).
柳树海, 刘晓峰. 木薯非粮燃料乙醇生产技术的发展. *酿酒*, 2010, 37(2): 9-11.
- [22] Li B, Deng LK. Cassava fuel ethanol industrial development status and trends. *Cereal Food Ind*, 2010, 17(5): 37-39 (in Chinese).
李北, 邓立康. 木薯燃料乙醇产业发展状况和趋势. *粮食与食品工业*, 2010, 17(5): 37-39.
- [23] Wu GQ, Luo H, Deng LK, et al. Demands and suggestions for industrial bio-technology from COFCO's experience. *Chin Basic Sci*, 2009, (5): 100-104 (in Chinese).
武国庆, 罗虎, 邓立康, 等. 中粮生产企业对工业生物技术发展的若干思考. *中国基础科学, 工业生物技术专刊*, 2009, (5): 100-104.
- [24] Moriizumi Y, Suksri P, Hondo H, et al. Effect of biogas utilization and plant co-location on life-cycle greenhouse gas emissions of cassava ethanol production. *J Clean Prod*, 2012, 37: 326-334.

(本文责编 陈宏宇)