

生物燃料系统分析模型

常世彦^{1,2}, 张希良^{1,3}, 赵丽丽^{1,3}, 欧训民^{1,3}

- 1 清华大学中国车用能源研究中心, 北京 100084
2 清华大学低碳能源实验室, 北京 100084
3 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

摘要: 定量化系统分析模型是生物燃料潜力预测、影响分析及制定技术路线图和政策目标的重要工具。生物燃料供应链涉及很多行业, 需要进行基于农(林)业、能源、经济和环境等多学科领域的综合分析。以下从生物燃料系统分析所需解决的问题出发, 梳理了国内外生物燃料系统分析的一般方法, 重点对农(林)业系统模型、能源系统模型、综合评价模型、微观成本、能耗和排放分析模型以及生物燃料专项宏观分析模型的主要优缺点和适用性进行了分析, 给出了相应的应用实例, 并强调根据特定的研究问题, 选择具有不同适用性的模型和研究路线。有助于研究人员和政策制定者更好地了解生物燃料系统分析方法, 也为我国学术研究机构建立生物燃料分析模型提供了参考。

关键词: 生物燃料, 系统分析, 能源系统, 综合评价模型

Model-based biofuels system analysis: a review

Shiyan Chang^{1,2}, Xiliang Zhang^{1,3}, Lili Zhao^{1,3}, and Xunmin Ou^{1,3}

- 1 *China Automotive Energy Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
2 *Low Carbon Energy Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
3 *Institute of Nuclear and New Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract: Model-based system analysis is an important tool for evaluating the potential and impacts of biofuels, and for drafting biofuels technology roadmaps and targets. The broad reach of the biofuels supply chain requires that biofuels system analyses span a range of disciplines, including agriculture/forestry, energy, economics, and the environment. Here we reviewed various models developed for or applied to modeling biofuels, and presented a critical analysis of Agriculture/Forestry System Models, Energy System Models, Integrated Assessment Models, Micro-level Cost, Energy and Emission Calculation Models, and Specific Macro-level Biofuel Models. We focused on the models' strengths, weaknesses, and applicability, facilitating the selection of a suitable type of model for specific issues. Such an analysis was a prerequisite for future biofuels system modeling, and represented a valuable resource for researchers and policy makers.

Keywords: biofuel, system analysis, energy system, integrated assessment model

Received: November 26, 2010; **Accepted:** February 21, 2011

Supported by: Major International (Regional) Joint Research Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 50520140517), National Natural Science Foundation of China (No. 91010016).

Corresponding author: Shiyan Chang. Tel: +86-10-62796207; Fax: +86-10-62796617; E-mail: changshiyan@tsinghua.edu.cn

国家自然科学基金重大国际合作研究项目 (No. 50520140517), 国家自然科学基金 (No. 91010016) 资助。

生物燃料研究涉及农(林)业系统、能源系统、土地资源系统和水资源系统等。构建一套有效的定量分析模型框架对于生物燃料发展预测、生物燃料技术路线图和生物燃料影响分析等具有重要的作用。生物燃料系统分析模型已在许多具有全球影响力的研究成果中发挥作用。例如,国际能源署(International energy agency, IEA)发行的《世界能源展望》,从2006年开始就在其基础研究工具——世界能源模型(World energy model, WEM)中对生物燃料的利用和供应情况进行专门估算,并逐年完善^[1];纳入生物燃料技术的AGLINK-COSIMO模型为联合国粮食及农业组织(Food and agriculture organization of the united nations, FAO)的《全球粮食及农业状况报告(The state of food and agriculture)》和经合组织与粮农组织(OECD-FAO)共同发布的《中期全球农业展望(Medium-Term agriculture outlook)》^[2-3]提供了重要的分析依据。很多区域层面的生物燃料政策,如发展目标、规划或技术路线图,也往往基于一定的生物燃料系统分析模型,如欧盟生物燃料技术路线图项目(REFUEL)^[4]和美国环保署(Environmental protection agency, EPA)的再生燃料标准(Renewable fuel standard, RFS)^[5]。

本文尝试从生物燃料系统分析所需解决的问题出发,梳理国内外生物燃料系统分析的一般方法,

重点对农(林)业系统模型、能源系统模型、综合评价模型、微观成本、能耗和排放分析模型以及生物燃料专项宏观分析模型的主要优缺点和适用性进行了分析。

1 生物燃料系统分析的主要研究问题

生物燃料系统分析所要解决的是生物燃料所处系统或生物燃料内部系统不同要素之间的相互关系。从资源投入、原料生产和收集、燃料转化到产品分销,生物燃料供应链不同阶段都有复杂的替代和均衡关系。例如,在原料生产和收集阶段,可以作为生物燃料原料的能源作物和粮食作物之间有替代竞争关系;在产品分销阶段,生物燃料与传统油品或煤基燃料也有替代竞争关系。生物燃料供应链上不同的均衡关系基本可分为:要素均衡(土地、水和碳排放空间等)、原料均衡和燃料均衡等。据此,可以将相关研究方法分为农(林)业模型、能源模型、综合评价模型、微观成本、能耗和排放分析模型以及生物燃料专项宏观分析模型。农(林)业系统模型以要素均衡和原料均衡作为主要研究对象,能源系统模型主要研究交通燃料均衡以及交通燃料与其他能源产品之间的均衡,综合评价模型则试图将这些均衡关系放在同一个模型框架内进行模拟或仿真(图1)。

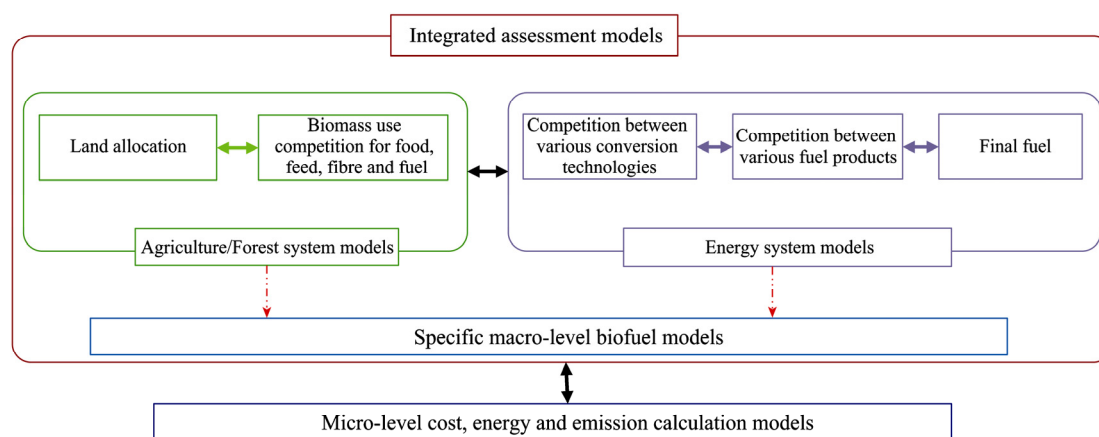


图1 生物燃料系统分析模型分类框架图

Fig. 1 Classification framework of model-based biofuel system analysis.

2 农 (林) 业系统模型 (Agriculture/Forestry system models)

传统一代生物燃料所采用的原料为粮食、糖类或油料作物, 例如美国的玉米乙醇、巴西的甘蔗乙醇和欧洲的油菜柴油。这些原料往往是国际农产品市场的重要组成部分。生物燃料的大规模生产会对这些农产品的市场结构产生影响, 从而影响到全球农产品的供应和需求甚至粮食安全。因此, 很多关注农 (林) 业问题的机构近几年都将目光投向了生物燃料领域, 分析全球农产品市场的供求和价格趋势及与生物燃料发展之间的关系。粮农组织和国际粮食政策研究所 (International food policy research institute, IFPRI) 是该领域的主要代表研究机构 (表 1)。

农 (林) 业模型的特点是强调对主要农 (林) 业产品的细化分析。例如, AGLINK-COSIMO 模型是一个大规模动态局部均衡模型, 再现了世界上 58 个从事主要温带农产品及稻米、食糖和棕榈油生产和贸易的国家及区域的全面动态经济 and 不同政策情况, 用以研究全球农业市场。

将生物燃料纳入已有的模型系统需要对原有模

型进行改造。如 IMPACT 模型可以描述粮食供应、需求和贸易。粮食需求由食品、饲料和其他用途构成, 而新纳入的生物燃料模块被作为其他用途来建模。另外, 有些模型考虑了农 (林) 产品的副产品——剩余物资源, 从而扩大了其研究领域^[7]。例如, 由田纳西大学农学院开发的 POLYSYS 模型是主要研究美国农业部门供需状况的经济仿真模型, 包含区域层面作物供应模块, 国家层面畜产品模块, 国家层面作物需求模块和国家层面收入模块 4 大模块, 考虑了 12 种主要的作物和 7 种主要的畜产品。De la torre ugarte D 等^[8]对该模型进行了更新, 加入了生物燃料部分, 并在原料端加入了剩余物和柳枝稷等能源作物。

农 (林) 业模型的优点是适合于将生物燃料供应链前端的原料均衡关系和要素均衡关系作为研究对象, 评价对农产品价格的影响, 对土地利用和水资源利用的影响等, 所以较适合于分析一代生物燃料。其缺点是没有在能源供应和需求的整体框架下分析生物燃料的发展及影响, 缺乏专业的能源转化技术的分析模块, 对生物燃料的需求缺乏充足论证依据。

表 1 农 (林) 业系统模型

Table 1 Agriculture/Forestry system models

Model	Developer	Method	Applications
AGLINK-COSIMO ^a	OECD/FAO	PE ^b	It has been used to analyze biofuel market and policy impact in the series report of <i>The State of Food and Agriculture</i> ^[6]
IMPACT ^c	IFPRI	PE	Msangi, Sulser, Rosegrant, et al ^[7] examines three alternative scenarios, conventional scenario, second generation scenario and second generation plus scenario, to evaluate global biofuel impacts and implications
POLYSYS ^d	University of Tennessee	Hybrid	De la torre ugarte D, English B, Jensen K, et al ^[8] examines the impacts of expanded level of ethanol and biodiesel production and indicates that producing 60 billion gallons of ethanol and 1.6 billion gallons of biodiesel can be achieved without using CRP lands; Walsh, De La Torre Ugarte, English et al ^[9] analyses the impacts of supplying 25% of projected 2025 U.S. transportation fuels to agricultural demand and farm income
CHINA GRO ^e	Free University of Amsterdam & Chinese Academy of Science	PE	Huang ^[10] analyzes the impacts of China's bio-ethanol production on domestic agricultural prices, national and regional agricultural productions and farm value added

a: commodity simulation model; b: partial equilibrium; c: international model for policy analysis of agricultural commodities and trade; d: policy analysis system; e: decision support system for China's sustainable development of agriculture.

3 能源系统模型 (Energy system models)

生物燃料技术是重要的低碳能源技术, 在减缓碳排放和维护能源安全方面发挥重要作用。绝大多数能源系统分析模型都将现代生物质能作为重要的研究对象 (表 2)。与农 (林) 业模型不同, 能源模型以主要能源产品为研究对象。例如, 全球多区域 MARKAL 模型 (Global multi-region MARKAL model, GMM) 研究原煤、天然气、液化天然气、原油、柴油、汽油等能源产品。生物燃料也被作为能源产品纳入了其最新的版本中^[11]。

能源系统分析模型研究的侧重点是能源产品之间的替代均衡关系, 可以分析生物燃料与其他交通燃料之间的替代均衡, 也可以从一次能源开始分析不同生物质能用途之间的均衡。

对于传统的能源模型, 在生物燃料建模过程中遇到的最大问题是对资源需求和影响的描述。生物燃料的原料成本占很大比例, 尤其是一代生物燃料, 随粮食和农产品市场价格的变动有较大波动, 所以, 擅长用能源模型来解决问题的研究者们很快发现, 生物燃料与传统能源技术差距较大, 必须辅以特定研究方法。于是越来越多的研究人员或者选择与农

(林)业模型进行软连接 (Soft link), 或开发可与传统能源模型相耦合的生物燃料子模块。例如, 美国能源部 NEMS 模型的生物质能系统模块 (Biofuel supply submoduel, BSS) 的数据多来源自一个外部模型——农业资源跨区域分析模型 (Agricultural resources interregional modeling system, ARIMS)。ARIMS 模型由美国农业部在上世纪 80 年代开发, 是用于进行资源配置的线性规划模型, 可以重点分析生物燃料的原料成本^[15]。

4 综合评价模型 (Integrated assessment models)

20 世纪 90 年代, 随着人类对环境和气候变化问题的关注, 在以往模型的基础上形成了能源-经济-环境(3E)模型, 模型不断完善和发展, 逐渐囊括经济、社会、人口、自然、生物、能源、环境等多个方面, 成为人类认识气候变化问题的有力工具。这类能源-经济-气候 (Energy-Economic-Climate) 模型体系, 尝试兼容并包的跨学科研究理念, 结合了农 (林) 业和能源模型的特点, 同时尝试模型化不同子系统之间的传递和反馈关系 (表 3)。例如, 国际应用系统分析研究所 (IIASA) 开发的生态经济模型包

表 2 能源系统模型

Table 2 Energy system models

Model	Developer	Method	Applications
GMM	PSI ^f ,	LP ^g	Gul, Kypreos, Turton, et al deals with the long term prospects of alternative fuels in global personal transport
MARKAL-MAT TER	ECN ^h ,	LP	De Feber and Gielen ^[12] determines the optimal use of biomass for energy and materials, covers electricity production from biomass, biomass heat, biofuels and gaseous fuels
NEMS ⁱ	DOE ^j	Simulation	Kelly and Gustavo ^[13] examines different policy scenarios for reducing GHG emissions and oil consumption in the U.S. transportation sector
TIMER ^k	NEAA ^l	SD ^m	Energy System Module of IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment)
WEM ⁿ	IEA	Hybrid	It has been used to World Energy Outlook
MESSAGE ^o	IIASA ^p	LP	Chai, Chang, Zhang, et al ^[14] identifies the contributions and challenges via the quantitative analysis of potential of biofuel in China

f: paul scherrer institute (Switzerland); g: liner programming; h: energy research centre of the Netherlands; i: national energy modeling system; j: department of energy (United States); k: targets image energy regional model; l: netherlands environmental assessment agency; m: system dynamic; n: world energy Model; o: model for energy supply strategy alternatives and their general environmental impacts; p: international institute for applied systems analysis.

表 3 综合评价模型

Table 3 Integrated Assessment Models

Model	Developer	Method	Applications
DART ^q	Kiel Institute for the World Economy	CGE	Kretschmer, Peterson and Ignaciuk ^[16] extends the CGE model DART to include first-generation biofuel production technologies. And as a example analyze the effects of a 10% biofuel target in the EU; Kretschmer, Narita and Peterson ^[17] assesses the economic effects of the EU biofuel target
EPPA ^r	MIT	CGE	Reilly and Paltsev ^[18] incorporates biomass energy production and competition for land into the model;
IIASA Ecological-Economic model ^s	IIASA	Hybrid	OFID/IIASA ^[19] assesses the agro-ecological potential of all major biofuels crops – first and second – generation and to evaluate the social, environmental and economic impacts and implications of biofuels developments on transport fuel security, climate change mitigation, food security and so on
WorldScan	CPB ^t	CGE	Boeters, et al ^[20] analyses the potential for biofuels alongside the EU Emissions Trading Scheme (EU-ETS).

q: dynamic applied regional trade; r: emissions prediction and Policy analysis; s: the name of the comprehensive method is given by authors; t: netherlands bureau for economic policy analysis.

括了 IIASA 的农业生态区域模型 (Agro-ecological zone, AEZ), 全球粮食系统模型 (Global food system model) 和大气环流模型 (General circulation model, GCM) 等, 构成了一个具有反馈系统的全球粮食-饲料-生物燃料系统 (Global food-feed-biofuel system)。综合评估模型建模较为复杂, 而且需要大量的数据支持。

5 微观成本、能耗和排放分析模型

除以上 4 类模型外, 还有一类模型在生物燃料的研究领域发挥了重要作用。尽管这一类模型并不着重于分析各类原料和技术的替代均衡关系, 但是它们对于各类技术评价中关键的成本、能耗和排放数据的客观计算可以提供重要的决策依据。此类模型的代表有美国可再生能源实验室 (National renewable energy laboratory, NREL) 的成本分析模型和美国阿岗国家实验室 (Argonne national laboratory) 的 GREET (Greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation) 模型。NREL 开拓了用工程仿真模型分析生物燃料成本的研究框架^[21], 很多研究人员基于这一框架开展分析。根据采用参数的不同, 这类模型可以分为两种, 一种是利用近期的实验数据为主要参数, 另一种是基

于对未来成熟技术的假设, 以较为激进的数据为主要参数, Yang 和 Lu^[22]称其为成熟技术模型 (Mature model), 如 Lynd 等^[23]。在基于工程仿真模型的成本分析研究中, Yang 和 Lu^[22]采用这一模型框架对中国生物燃料工程成本进行了估算。GREET 模型是国际知名且被广泛应用的车用燃料的能源使用和污染物排放的微观分析模型。其灵活的模型结构和平台为许多研究人员提供了“透明”的数据共享平台。GREET 模型在政策制定中发挥了越来越多的实质作用。美国 EPA 的再生燃料标准和加州的低碳燃料标准 (Low carbon fuel standard) 都是以该模型作为分析工具。EBAMM^[24]和加州大学戴维斯分校的 LEM (Lifecycle emissions model)^[25]也是该领域较为知名的模型。清华大学中国车用能源研究中心对 GREET 模型进行了模型结构和数据的本地化调整, 形成中国版本的参数体系, 并在此基础上对生物燃料能耗和排放进行 WTW (Well-to-Wheel, 从矿井到车轮) 分析^[26]; 同济大学汽车学院^[27]和中国科学院广州能源所^[28]等机构也都开展了全生命周期能耗和碳排放研究工作。我国农业部规划设计院与意大利都灵理工大学合作建立了能源作物能量平衡全生命周期评价模型 (E-CEBM)^[29], 对我国燃料乙醇生产示范工程进行了全面评价。

6 生物燃料专项宏观分析模型

目前, 国内外生物燃料宏观系统分析模型构建思路有 2 个分支: 一是将生物燃料纳入已有的系统分析模型中, 如以上所介绍的农(林)业系统模型、能源系统模型和综合评价模型; 二是提炼重要的供求关系, 构建专项的生物燃料模型。生物燃料专项宏观分析模型是综合考虑农(林)业、能源、经济、环境多维因素的具有创新性的跨学科分析模型, 能够提取重要的均衡关系加以描述, 较为综合地反映生物燃料系统。

6.1 BioTrans 模型的背景、原理和主要结论

由荷兰能源研究中心 ECN 开发, 先用于欧盟委员会支持的 VIEWLS 项目 (Clear views on clean fuels, NNE5-2001-00619) (2003~2005 年), 用以为欧盟生物燃料市场分析提供必要的数据支持和量化分析工具^[30], 后用于 REFUEL 项目 (2006~2008 年)。REFUEL 项目由欧洲智能能源计划 (Intelligent energy Europe program) 资助, 由 7 个不同的欧盟研究机构就资源潜力、成本、政策效应等因素进行合作研究, 旨在构建欧盟生物燃料技术路线图, 以实现欧盟内部寻求生物燃料领域的合作及长期远景的制定。REFUEL 技术路线图侧重于两方面的研究, 一是原料潜力, 二是全链条生物燃料成本, 基于这两方面研究来寻找能够实现 2020 年 10% 生物燃料目标的成本最优的生物燃料技术组合^[31]。

BioTrans 模型既可以研究一代生物燃料技术, 也可以研究二代生物燃料技术。到目前为止共包含 18 种原料和 24 种转化技术, 仅处理生物燃料技术之间的竞争并不考虑生物燃料与化石燃料的竞争。BioTrans 是一个近视 (Myopic) 的成本优化模型^[4], 其原理为一个网络流模型, 需要设定消费目标, 然后寻找最优的技术组合。在 VIEWLS 项目时, 模型使用外生的技术进步率, 而在 REFUEL 项目时, 增加了内生的学习曲线^[4]。分析结果包括生物燃料贸易流, 成本 and 环境影响等。

REFUEL 技术路线图中该模型的分析结论认为, 欧盟具有足够的土地和原料潜力来实现 2020 年 10% 生物燃料的目标, 而且只要发展传统的一代生物燃料就可以。但是在现有政策条件下, 传统生物燃料和二代生物燃料的市场扩散中将存在锁定效应, 通过传统生物燃料 (Conventional biofuel) 路径 (传统油菜籽生物柴油) 就可以实现经济效益的最大化。考虑到传统生物燃料的碳减排效应不明显, 而且容易引起与粮食安全之间的冲突等问题, 建议设置更为长远和更高的生物燃料目标, 将目标提升至 2020 年 14%, 2030 年为 25%, 只有在这种情况下, 二代生物燃料才有可能占据较为重要的位置^[32]。

6.2 生物燃料推广模型 (Biofuels deployment model, BDM)

美国 Sandia 国家实验室和 GM 公司联合开发了专项研究生物燃料的模型, 并开展了名为 900 亿加仑生物燃料推广研究, 评估未来美国纤维素乙醇的资源潜力和实际供应潜力以及 2030 年生产 900 亿加仑生物燃料, 以替代 600 亿加仑汽油的可能性、限制和推动因素。

其模型机理为系统动力学模型。该模型考虑了从种子到加油站 (“Seeds to Station”) 的物流、能流和成本结构, 据称这是实际意义上第一个基于生物燃料供应链的模型^[33]。

6.3 生物燃料情景模型 (Biofuel scenario model, BSM)

美国国家可再生能源实验室 (NREL), 基于 System of Systems (SoS) 的理念, 采用系统动力学方法, 在 STELLA 软件平台上构造了不同的生物燃料子系统, 主要包括原料生产、原料物流、生物燃料生产、生物燃料分销和生物燃料终端利用 5 个部分。他们同时将农民、燃料生产者、汽车制造商和政策制定者作为重要的利益相关者, 为模型提供前馈和反馈信息^[34-35]。

6.4 生物质-生物燃料模型 (Biomass-to-Biofuel, BTB)

为了能够更好地分析未来我国生物液体燃料发

展潜力,清华大学中国车用能源研究中心根据现有技术基础设施条件,构建了生物质-生物燃料研究框架,这个研究框架具备的特点包括:1)在资源分析环节,采取自底向上估测和资源平衡表方法,对原料地理潜力进行分析;2)采用工程仿真模型对技术成本构成及变动机制进行定量描述;3)基于MESSAGE 能源系统分析模型平台,利用现有的能源技术经济模型分析未来发展趋势;4)加入土地资源、水资源和 GHG 排放影响分析模块;5)与车用能源研究的总模型具有输入和输出的接口。

基于这一模型体系,清华大学中国车用能源研究中心采用情景分析的研究方法,通过识别影响生物燃料发展的关键要素,模拟了不同政策和技术路径的可能前景,并对其进行了综合评价。

7 结论

定量化系统分析模型是生物燃料潜力预测、技术路线图研究和影响分析的重要工具。农(林)业系统模型侧重于资源均衡和原料均衡的研究,更适用于研究一代生物燃料;能源系统模型侧重于燃料均衡和能源均衡的研究;而综合评价模型具有反馈系统,但技术含量较高,所需数据量较大。生物燃料专项模型可以提供专项生物燃料分析。应根据研究问题的不同和模型适用性的不同,选择具体的研究路线。

REFERENCES

- [1] International Energy Agency. World energy model-methodology and assumptions [EB/OL]. [2010-10-26]. http://www.worldenergyoutlook.org/docs/annex_c.pdf.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2008 [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.fao.org/docrep/011/i0100e/i0100e00.htm>.
- [3] Organization for Economic Co-operation and Development-Food and Agriculture Organization of the United Nations. OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016 [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.agri-outlook.org/dataoecd/6/10/38893266.pdf>.
- [4] Lensink S, Londo M. Assessment of biofuels supporting policies using the BioTrans model. Biomass Bioenergy, 2010, 34(2): 218-226.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency. Final rule of renewable fuel standard [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.regulations.gov/#!documentDetail;D=EPA-HQ-OAR-2005-0161-3220>.
- [6] Organization for Economic Co-operation and Development. Working party on agricultural policies and markets-documentation of the AGLINK-COSIMO model [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.agri-outlook.org/dataoecd/54/11/45172745.pdf>.
- [7] Msangi S, Sulser T, Rosegrant M, et al. Global scenarios for biofuels: impacts and implications for food security and water use. Tenth annual conference on Global Economic Analysis special session on "CGE modeling of climate, land use, and water: challenges and applications". Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2007.
- [8] De la Torre Ugarte D, English B, Jensen K, et al. Economic and agricultural impacts of ethanol and biodiesel expansion [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://beag.ag.utk.edu/pp/Ethanolagimpacts.pdf>.
- [9] Walsh ME, De La Torre Ugarte DG, English BC, et al. Agricultural impacts of biofuels production. J Agri Appl Economics, 2007, 39(2): 365-372.
- [10] Huang JK, Qiu HG, Keyzer M, et al. Impacts of bioethanol development on China's regional agricultural development. China Economic Quarterly, 2009, 8(2): 727-742. 黄季焜, 仇焕广, Keyzer M, 等. 发展生物燃料乙醇对我国区域农业发展的影响分析. 经济学, 2009, 8(2): 727-742.
- [11] Gül T, Kypreos S, Turton H, et al. An energy-economic scenario analysis of alternative fuels for personal transport using the Global Multi-regional MARKAL model (GMM). Energy, 2009, 34(10): 1423-1437.
- [12] De Feber MAPC, Gielen DJ. Biomass for greenhouse gas emission reduction (ECN-C-99-078) [EB/OL]. [2010-10-26]. <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2000/c00001.pdf>.
- [13] Gallagher KS, Collantes G. Analysis of policies to reduce oil consumption and greenhouse gas emissions from the U.S. transportation sector [EB/OL]. [2010-10-26]. http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/2008_Gallagher_Collantes_AutoPolicyModelingResults.pdf.
- [14] Chai QM, Chang SY, Zhang XL. Research on the potential of bio-fuel in China using ALTRANS model. Chin J Management, 2008, 5(5): 642-646. 柴麒麟, 常世彦, 张希良. 基于 ALTRANS 模型的我国生物燃料发展潜力研究. 管理学报, 2008, 5(5): 642-646.
- [15] U.S. Energy Information Administration. Model

- documentation renewable fuels module of the National Energy Modeling System [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?jsessionid=1C6E9F6191D55A41F7802E0D0E72A0E5?purl=/10109684-KE9HUF/webviewable/>.
- [16] Kretschmer B, Peterson S, Ignaciuk A. Integrating biofuels into the DART model [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.ifw-members.ifw-kiel.de/publications/integrating-biofuels-into-the-dart-model/kwp-1472>.
- [17] Kretschmer B, Narita D, Peterson S. The economic effects of the EU biofuel target. *Energy Economics*, 2009, 31(2): S285–S294.
- [18] Reilly J, Paltsev S. Biomass and energy and competition for land (MIT joint program on the science and policy of global change) [EB/OL]. [2010-10-26]. http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJSPSGC_Rpt145.pdf.
- [19] The OPEC Fund for International Development/International Institute for Applied Systems Analysis. Biofuels and food security: implications of an accelerated biofuels production [EB/OL]. [2010-10-26]. http://www.ofid.org/publications/PDF/pamphlet/ofid_pam38_Biofuels.pdf.
- [20] Boeters S, Veenendaal P, van Leeuwen N, et al. The potential for biofuels alongside the EU-ETS (The Eleventh Annual GTAP Conference Future of Global Economy, Helsinki) [EB/OL]. [2010-10-26]. <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/3871.pdf>.
- [21] Wooley R, Ruth M, Sheehan J, et al. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis: current and futuristic scenarios (NREL/TP-580-26157) [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/26157.pdf>.
- [22] Yang B, Lu YP. Perspective the promise of cellulosic ethanol production in China. *J Chem Technol Biotechnol*, 2007, 82: 6–10.
- [23] Lynd LR, van Zyl WH, McBride JE, et al. Consolidated bioprocessing of cellulosic biomass: an update. *Curr Opin Biotechnol*, 2005, 16(5): 577–583.
- [24] Farrel AE, Plevin RJ, Turner BT, et al. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*, 2006, 311(5760): 506–508.
- [25] Delucchi MA. A lifecycle emissions model (LEM): main texts(UCD-ITS-RR-03-17) [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.its.ucdavis.edu/publications/2003/UCD-ITS-RR-03-17-MAIN.pdf>.
- [26] Ou XM, Zhang XL, Chang SY, et al. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China. *Appl Energy*, 2009, 86(1): S197–S208.
- [27] Hu ZY, Tan PQ, Lou DM, et al. Assessment of life cycle energy consumption and emissions for several kinds of feedstock based biodiesel. *Transactions of the CSAFE*, 2006, 22(11): 141–146.
胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 不同原料制备生物柴油生命周期能耗和排放评价. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 141–146.
- [28] Dong DD, Zhao DQ, Liao CP, et al. Energy Consumption analysis in life cycle of cassava fuel ethanol production and the advantages of the new technology in energy consumption. *Transactions of the CSAFE*, 2008, 24(7): 160–164.
董丹丹, 赵黛青, 廖翠萍, 等. 木薯燃料乙醇生产的技术提升及全生命周期能耗分析. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 160–164.
- [29] Zhang YL, Gao XX, Wang AH, et al. Life-cycle assessment for Chinese fuel ethanol demonstration projects. *Renewable Energy*, 2009, 27(6): 63–68.
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.
- [30] Wakker A, Egging R, van Thuijl E, et al. Biofuel and bioenergy implementation scenarios [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://130.226.56.153/rispubl/NEI/nei-dk-4610.pdf>.
- [31] De Wit M, Junginger M, Lensink S, et al. Competition between biofuels: modeling technological learning and cost reductions over time. *Biomass Bioenergy*, 2010, 34(2): 203–217.
- [32] Londo M, Lensink S, Wakker A, et al. The REFUEL EU road map for biofuels in transport: application of the project's tools to some short-term policy issues. *Biomass Bioenergy*, 2010, 34(2): 244–250.
- [33] West T, Dunphy-Guzman K, Sun A, et al. Feasibility, economics and environmental impact of producing 90 billion gallons of ethanol per year by 2030 [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.sandia.gov/news/publications/white-papers/90-Billion-Gallon-BiofuelSAND2009-3076J.pdf>.
- [34] Bush B, Duffy M, Sandor D, et al. Using system dynamics to model the transition to biofuels in the United States (NREL/CP-150-43153) [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43153.pdf>.
- [35] Sandor D, Wallace R, Peterson S. Understanding the growth of the cellulosic ethanol industry (NREL/TP-150-42120) [EB/OL]. [2010-10-26]. <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42120.pdf>.