

考虑多维不确定性的生物能源供应链优化设计研究

高聪

(东北大学 工商管理学院,沈阳 110819)

摘要:生物能源产业可以一定程度上解决能源紧张、缓解秸秆烧荒带来的环境污染等问题.不断变化的外部情况对生物能源供应链的优化设计提出了挑战,其应能对市场需求和原料供应等外部条件的波动具有更强的适应性.将供应链运作过程中可能面临的多种不确定性要素纳入到模型中,建立了混合整数规划模型.模型以期望利润最大化为目标函数,决策精炼厂选址、生产规模、生物质原材料产地选择、精炼厂与客户之间的运输关系等问题.为验证模型的有效性,使用辽宁省地区的实际数据结合所提出的模型进行了验证,并进一步分析了所提出模型面对各种要素波动时的表现.

关键词:不确定性;生物能源供应链;辽宁地区;环境变化

中图分类号:F253.4

文献标志码:A

每年我国需要进口大量的化石燃料,如石油和天然气等.较高的能源对外依存度一定程度上影响国家安全.同时来自秸秆焚烧导致的空气污染也引起了社会的广泛关注.开发和利用生物能源能够一定程度缓解这两个问题,还可以提高农民的收入.但市场需求、原材料的供应量与价格的不确定性对生物能源的高效经济开发利用有一定负面影响.基于这些原因,本文研究了考虑多维不确定因素的生物能源供应链优化设计问题.

1 文献回顾

20 世纪 90 年代末,随着能源价格逐步走高以及生物能源转化技术的发展,生物能源产业开始快速发展,进而带动了生物能源物流/供应链研究的发展.较早的研究论文见文献[1-3].2007 年以后,随着碳排放问题的不断升温,生物能源供应链的优化设计与运营问题引起学术界的广泛关注,出现的相关论文数量逐年增长.关于生物能源供应链的研究按其目标函数不同可以概括为两类:最小化总运营成本和最大化系统利润.文献[4-5]分别对这两类问题进行了研究.文献[6]提出了动态混合整数规划模型,其中考虑了市场需求的不确定性以及项目投资对供应链设计和运营的影响.文献[7]提出了面向生物能源的混合整数规模模型,其中重点关注了供应链战略层次的设计.模型中包括了可能影响生物能源供应链表现一系列因素,如农业政策、生物质供应地选择、精炼厂选址、精炼厂产能设计、物流和运输系统优化等.文献[8]研究了生物能源供应链的多阶段优化问题,问题考虑精炼厂产能可以随着市场需求的增加而扩大,但提高产能需要付出高昂的费用和停产损失,作者将问题表达为一个混合整数规划模型并通过 CPLEX 进行求解.文献[9]对生物能源供应链不确定性和可持续性的综述中对其社会影响进行了分析,认为社会影响主要包括三方面:1)减少贫困人口;2)对土地分配和粮食产量的间接影响;3)对其他社会资源分配的影响,如水资源.KIM 等^[10]考虑生物质原材料的多样性、转化技术和精炼厂投资之间的相关性,建立了追求系统利润最大化的整数规划模型,并对集中化系统和非集中化系统做了分析比较.

收稿日期:2021-05-27;**修回日期:**2021-12-03.

基金项目:国家自然科学基金(71502030)

作者简介(通信作者):高聪(1980—),男,辽宁沈阳人,东北大学副研究员,博士,主要研究方向为供应链管理,E-mail:cgao@neu.edu.cn.

2 生物能源供应链优化设计模型

2.1 问题描述与假设

一个典型的生物能源供应链为 3 级结构,如图 1 所示,分为原材料产地、精炼厂和顾客。

本文研究的多维不确定性具体指:原材料获取的波动性、市场对生物能源需求的波动性和产品价格的波动性。在模型中,本文采用生成随机情境以反映这 3 种波动性。本文以期望利润最大化为目标函数,决策精炼厂选址、生产规模、生物质原材料产地选择、精炼厂与客户之间的运输关系等问题。

2.2 模型构建

下面介绍符号、参数和变量的定义。

- I 原料候选产地集合, $i \in I$;
- J 精炼厂备选厂址集合, $j \in J$;
- M 需求地结点集合, $m \in M$;
- G 精炼厂生产规模集合, $g \in G$;
- S 情境集合,其索引为 $s \in S$;
- c_{jg}^I 建立规模 g 的生物能源精炼厂的年化投资成本;
- c_{is}^R 情境 s 下在原料产地 i 处的原料采购单价;
- C_g^{capmax} g 规模精炼厂的年最大产能;
- C_g^{capmin} g 规模精炼厂的年最小产能;
- c_g^P 具有规模 g 精炼厂的单位生产成本;
- T 生物乙醇转化率;
- C_t^T 生物质原材料的运输成本;
- C_e^T 生物乙醇运输成本;
- A_{ij} 生物质原材料供应地 i 与备选生物乙醇精炼厂地址 j 间的距离;
- A_{jm} 备选精炼厂地址 j 与需求地 m 之间的距离;
- l_r 单位重量的原料装卸成本;
- l_e 单位重量的生物乙醇装卸成本;
- E_{is} 情境 s 下供应地 i 可用于生产生物乙醇的原料供应量;
- d_{ms} 情境 s 下客户 m 对生物乙醇需求量;
- α 规模系数;
- k 能力因子;

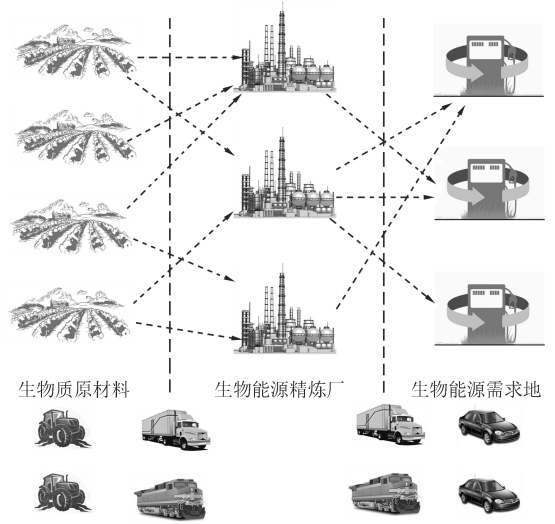


图1 生物能源供应链示例

Fig.1 Schematic representation of the supply chain

- r 折现率;
- t 运营时间;
- c_e^{os} 外源供应乙醇的单位成本;
- P 生物乙醇的出售价格;
- X_{jg} 0-1 变量,

$$\begin{cases} 1, & \text{将 } g \text{ 规模的精炼厂建立在 } j \text{ 地,} \\ 0, & \text{其他;} \end{cases}$$
- y_{is} 情境 s 下生物质供应链在产地 i 处的采购量;
- Q_{jsg} 情境 s 下生物质供应链中精炼厂 j 的年产量;
- O_{ms} 情境 s 下由外部购买并运输至需求地 m 的生物乙醇量;
- T_{ijs} 情境 s 下生物能源供应链由生物质原料产地与生物乙醇精炼厂之间的原料运输量;
- T_{jms} 情境 s 下生物能源供应链由生物乙醇精炼厂与需求地之间的乙醇运输量。

基于以上符号及变量,提出如下数学模型。

$$\max \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} P \left(\sum_{j \in J} T_{jms} + O_{ms} \right) - \left[\frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^t}} \sum_{j \in J} \sum_{g \in G} c_{jg}^i X_{jg} + \right.$$

$$\frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{g \in G} c_g^P Q_{jsg} + \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (c_r^T A_{ij} + l_r) \cdot T_{ijs} + \frac{1}{|S|} \left(\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} c_{is}^R y_{is} + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} c_e^{os} O_{ms} \right), \quad (1)$$

(1)式为本模型的目标函数,追求利润期望最大化.目标函数由两大项组成,第一大项表示总期望营业收入,第二大项表示总期望成本,两者之差表示总期望利润.营业收入的期望与成本的期望通过计算各情境下的收入和成本得到.本文中采用蒙特卡洛仿真方法处理各种不确定因素,因此各情境发生的概率是相等的.情境的总数量为 $|S|$,则各情境的发生概率均为 $1/|S|$.各情境下的收入为生物质能源供应链销售自产生物乙醇的量与外购生物乙醇量营业额的总和.第二大项总期望成本由4个分量构成,分别是:系统年化投资成本、系统生产总成本、系统运输总成本(包括原材料运输成本和产成品运输成本)和系统采购总成本.

模型的约束条件如下,具体约束的含义介绍写在相应的约束条件下面.

s. t.

$$\tau \sum_{i \in I} T_{ijs} = \sum_{g \in G} Q_{jsg}, \forall j \in J, s \in S, \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M} T_{jms} = \sum_{g \in G} Q_{jsg}, \forall j \in J, s \in S, \quad (3)$$

$$C_g^{\text{capmin}} \leq \sum_{g \in G} Q_{jsg} \leq C_g^{\text{capmax}}, \forall j \in J, s \in S. \quad (4)$$

(2)、(3)式为物流量平衡约束,其中(2)式左侧表示 s 情境下运送至精炼厂 j 的生物质总量乘以转化系数,右侧表示 s 情境下精炼厂 j 的生物能源产量;(3)式左侧表示 s 情境下由精炼厂 j 运送至需求地的生物质能源的量,右侧表示 s 情境下精炼厂 j 的生物能源产量.(4)式表示精炼厂的产量应在该规模对应的产能上下限之间,左右两项分别表示产能的下限和上限,中间一项表示产能的实际发生量.

$$y_{is} \leq E_{is}, \forall i \in I, s \in S, \quad (5)$$

$$y_{is} = \sum_{j \in J} T_{ijs}, \forall i \in I, s \in S, \quad (6)$$

(5)、(6)式表示供应链物流平衡约束,其中(5)式表示情境 s 下在原材料产地 i 采购的原材料的量,不应大于该供应地的产量;(6)式左侧表示情境 s 下原材料产地 i 的采购量,右侧表示情境 s 下从原材料产地 i 运出的原材料的总量,两者应该相等.

$$\sum_{j \in J} T_{jms} + O_{ms} = d_{ms}, \forall m \in M, s \in S, \quad (7)$$

(7)式表示需求地 m 的需求必须被满足,左侧两项分别表示情境 s 下运送至需求地 m 的生物质总量和情境 s 下外源采购并销售至需求地 m 的量,右侧表示情境 s 下需求地 m 的需求量,两者应该相等.

$$\sum_{g \in G} X_{jg} \leq 1, \forall j \in J, \quad (8)$$

(8)式表示对任意候选地址,只能选择一种生产规模.

$$X_{jg} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, g \in G, \quad (9)$$

$$y_{is}, T_{ijs}, T_{jms}, Q_{js}, O_{ms} \geq 0, \forall i \in I, j \in J, m \in M, s \in S, \quad (10)$$

(9)式表示决策变量 X_{jg} 只能在0或1中取值,是一个整数变量.(10)式表示 $y_{is}, T_{ijs}, T_{jms}, Q_{js}$ 和 O_{ms} 等为大于等于0的连续变量.

3 算例分析

为验证模型的有效性,本节以辽宁地区的实际数据结合上述模型进行结算,并检验模型的鲁棒性.辽宁省农业发达,玉米种植范围广,可以为生物质能源供应链提供充足稳定的原材料供给.同时辽宁为相对发达省份,对能源需求比较旺盛,因此辽宁地区适合作为本论文的研究对象.本文采用蒙特卡洛模拟方法反映各种因素的波动性,根据收集的数据随机产生100个情境作为输入数据.本文所有实验均使用CPLEX 12.5软件求解.

3.1 实验数据

以辽宁省14个地级市为原材料供应地、精炼厂的候选地和顾客.各地玉米秸秆相关数据如年总产量等

数据可以根据文献[11]和经济年鉴^[12]获得.根据文献[13]得到 2006 以来历年辽宁省各地级市年降雨量,通过参数估计得到各地区降雨量的正态分布参数.引用文献[13]中关于玉米产量与降水量之间的关系随机产生各原材料供应地玉米秸秆的可获得量.玉米秸秆的采购价格由正态分布随机产生,其中设采购价格初始均值为 90 元/t,标准差为 0.95.参考文献[14]中数据,本文设定玉米秸秆的乙醇转化率为 189.27 L/t.

精炼厂的总固定资产投资依赖于其设计生产规模,根据文献[15-16]得到(11)式估算生产规模与固定资产投资之间的关系,

$$i_c = a \cdot C^k, \tag{11}$$

其中 i_c 为总固定成本, C^k 为标准生产能力.根据文献[15-16],令能力因子 $k=0.836$,规模系数 $\alpha=1.132 \times 10^6$.本文考虑时间为 10 a,采用 10 年期国债的利率 3.5%作为折现率折算得出不同规模下的年化固定成本.本文设定大小两种可选则的生产规模:15 万 t/a 和 25 万 t/a.通过(11)式可得总固定成本,进而得到年化固定成本.

辽宁省地区从 2004 年开始强制使用乙醇汽油,根据发改委能源局标准,乙醇汽油中乙醇的混入比例为 10%.根据辽宁省历年统计年鉴,可以得到省内地级城市的历年汽油年消费量.根据比例,可以计算得到每年对生物乙醇的需求.假设需求的波动服从正态分布,0.9 为方差,随机产生各市的需求,并结合玉米秸秆产量和价格等随机变量,生成 100 个情境.

结点间的距离由文献[17]查阅可得.生物质原材料与生物乙醇的运价通过查阅万得数据库得到,具体数据:玉米秸秆 0.3 元/(t·km),生物乙醇 0.9 元/(t·km),装卸费用 20 元/t.

3.2 算例结果报告

根据以上数据结合模型,通过 CPLEX 求解得到目标函数(期望利润)为 145 821.42 万元.计算结果中分别在沈阳和锦州建立大规模和小规模精炼厂各一座.所有情境下,两处精炼厂产量均值分别为:沈阳 23.60 万 t 和锦州 13.48 万 t.沈阳和锦州处于辽宁省相对中心位置,在运输便利性上具有较强的优势.原料的供应量与乙醇的配送量如表 1 所示.

高聪等^[18]在考虑确定性条件下以辽宁省为研究对象进行了生物能源供应链的优化设计研究.与此研究进行对比可以发现,是否考虑不确定性对供应链的构造和布局有较大影响.在其他参数基本相似但不考虑不确定因素的情况下,文献[18]中生物能源供应链选择在锦州和辽阳两地建设生物能源精炼厂,而本文选择在锦州和沈阳建设两处生物能源精炼厂.分析两者的区别,在于确定性条件下的结果选择了辽阳,而不确定性条件下选择了沈阳.

其背后的原因在于辽阳具有相对沈阳更靠近辽宁省中心的地理位置和更低的固定设施建设成本,在确定性条件下可以稳定地从自身及周边采购原材料;但在不确定条件下,随着生物质原材料可获得性的波动,位于辽阳的精炼厂在有些情境下需要从较远的铁岭和抚顺采购原材料,这导致了其期望总成本更高.选址沈阳的好处在于,沈阳自身及周边的铁岭都是辽宁省主要的粮食产地,在所有情境下都可以提供精炼厂所需的大部分原材料,抗波动能力更强.

系统的总期望收入为 30.3 亿元,总期望成本为 15.72 亿元.各情境中外源采购量均为 0,表示沈阳和锦州两处精炼厂产能可以满足辽宁地区对生物乙醇的需求,无须外部采购.

表 1 生物能源供应链物流网络配送关系

Tab. 1 Logistics network distribution relationship of bioenergy supply chain

厂址	原材料供应量/(万 t)	满足的需求/(万 t)
沈阳		沈阳(8.92)
		大连(3.47)
	沈阳(93.91)	鞍山(2.65)
	鞍山(1.67)	抚顺(1.45)
	抚顺(20.36)	本溪(1.10)
	本溪(3.38)	丹东(1.23)
	辽阳(22.51)	营口(1.79)
	铁岭(54.82)	辽阳(1.55)
		盘锦(1.60)
锦州		铁岭(1.24)
		大连(4.16)
		锦州(2.26)
	锦州(67.12)	营口(0.07)
	朝阳(8.41)	阜新(1.33)
	葫芦岛(19.37)	盘锦(1.60)
	朝阳(2.50)	
	葫芦岛(1.55)	

在该配置下,生物乙醇供应链各部分成本为:固定资产投资成本占总成本的 57%,原材料采购成本为 20%,生产成本为 14%、运输成本为 9%。大多数情境下,精炼厂原材料主要由精炼厂所在地或临近地点供应。由于在模型中考虑了生物质原材料和生物乙醇的运输成本,所以精炼厂地址(沈阳和锦州)均分布在辽宁省相对中心的位置也距离需求地较近,所以运输成本在总成本中所占比例较低。

生物能源供应链的优化结果主要受两方面因素影响:1)需求量的波动;2)原材料采购价格的波动。为了对生物能源供应链优化模型进行敏感度分析,本文研究了优化模型在需求量和原材料采购价格变化情况下的表现。

(1)生物能源供应链优化模型受需求水平变动的影响分析。政府连续在十二五、十三五和十四五计划中提到碳减排,2020 年更是提出了到 2060 年实现碳中和的目标,因此,社会对生物能源的需求也会显著增加。所以本文分别设置需求分布期望为原需求期望的 90%,110%,120%和 130%这 4 种需求水平,其中只考虑一种需求降低的情况,并对每一种需求水平进行求解。

图 2 和图 3 中,L0,L1,L2,L3,L4 分别表示需求是原需求的 90%,100%,110%,120%,130%。

可以看到,随着需求的增加,生物能源供应链的利润也随之增加,但增长速度放缓。这主要来自两个方面的原因。1)边际效应降低,因为模型以最大化总利润为目标函数,在配置供应链时总是优先考虑较低成本和较高收益的方案。当需求增加时,为满足需求,生物能源供应链必须从一些成本较高的地区采购原材料并且服务一些利润较低的需求地。2)当需求持续增加时,在部分情境下出现了产能不能满足需求的情况。但因为产能缺口较少,且这种产能不能满足需求的情境数较少,不足以促使系统建设新的精炼厂,生物能源供应链采用外源采购生物乙醇的方式以满足需求,这进一步增加了成本并降低利润率。

图 2 和图 3 比较了不同需求水平条件下供应链成本构成情况。其中固定资产投资成本受需求变化影响较小,这是因为需求的增加并没有导致精炼厂数量的增加,仅是精炼厂规模从 100%情况下的一大一小,变为 130%情况下的两大。受需求影响较大的成本要素是采购成本和生产成本,两者与生物能源供应链的产量间有直接关系。

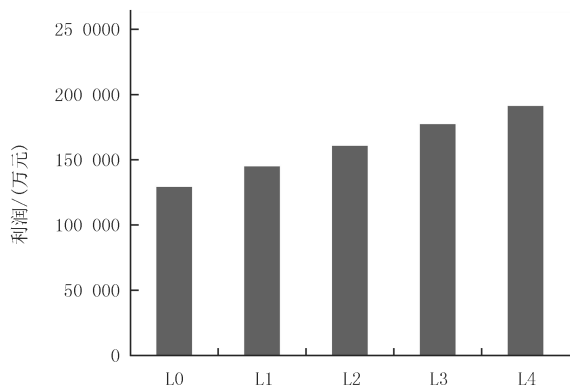


图2 需求水平变化对期望总利润的影响

Fig.2 Impact on the expected total profits at different demand levels

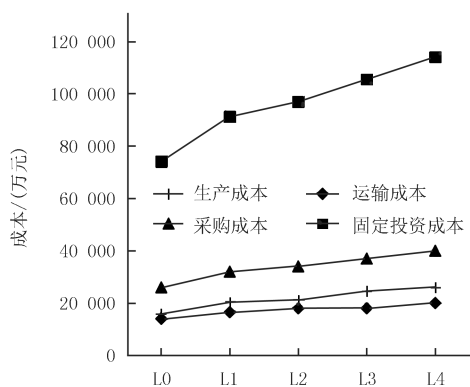


图3 不同需求水平的成本组成情况

Fig.3 The constitution of costs at different demand levels

(2)原料价格变动对模型的影响分析。影响玉米秸秆产量的因素主要包括天气状况和国家的农业政策等。秸秆的产量变化会带动价格波动,更进一步影响供应链获取原材料的成本,具体包括采购成本和运输成本。本文设原材料基准价格为 90 元/t,以 L0—L4 表示 5 个采购价格水平,分别为原材料价格的 80%,90%,100,110%和 120%。

5 种采购价格水平下的单位产品的获利情况如图 4 所示。图 4 中,单位产品的利润随着原料价格的增加而减少,这主要是因为相应的采购成本的增加,而关于生物能源供应链网络结构方面,求解结果中其并不随着采购价格的变化而变化,生物能源供应链的配置不变,这是因为本文假设 14 个原料供应地的采购价格相同,不管采购价格如何变化,各个原料供应地的价格都同时变化,对于精炼厂的选址、原料和需求的供应关系

不会产生影响.

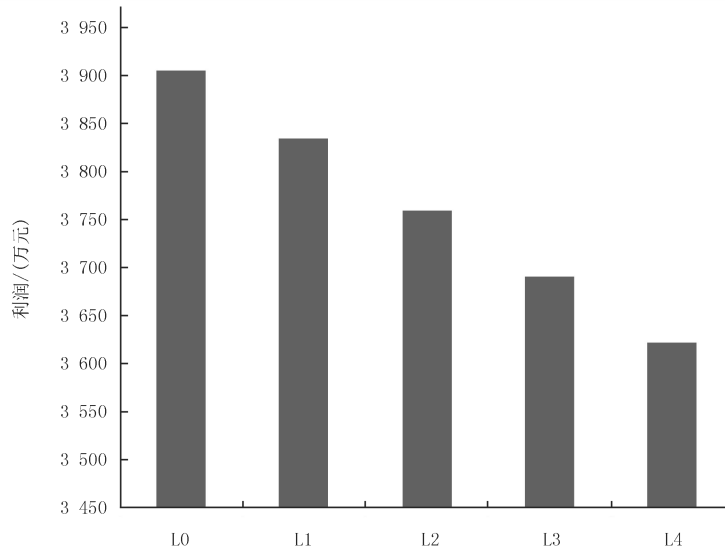


图4 单位产品利润受原材料价格影响

Fig.4 The impact of procurement price levels on unit profits

4 结 论

能源紧张和空气污染是目前我国面临的两个亟需解决的问题.本文研究了在考虑多种不确定因素下的生物能源供应链优化设计问题.建立了以期望总利润最大化为目标的混合整数规划模型,采用 CPLEX 软件求解,决策精炼厂选址、生产规模、生物质原材料产地选择、精炼厂与客户之间的运输关系等问题.并进行了灵敏性分析,讨论了该模型在需求和采购价格发生变化时的不同表现.在未来的研究中,可拓展为多周期模型,从而可以考虑失效事件对于生物能源供应链的影响.

参 考 文 献

- [1] CUNDIFF J S, DIAS N, SHERALI H D. A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system[J]. *Biore-source Technology*, 1997, 59(1): 47-55.
- [2] FORSBERG G. Biomass energy transport: Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 19(1): 17-30.
- [3] TATSIOPOULOS I P, TOLIS A J. Economic aspects of the cotton-stalk biomass logistics and comparison of supply chain methods[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 24(3): 199-214.
- [4] DUNNETT A, ADJIMAN C, SHAH N. Biomass to heat supply chains: applications of process optimization[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85(5): 419-429.
- [5] DUNNETT A J, ADJIMAN C S, SHAH N. A spatially explicit whole-system model of the lignocellulosic bioethanol supply chain: an assessment of decentralised processing potential[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2008, 1(1): 13.
- [6] MAS M D, GIAROLA S, ZAMBONI A, et al. Capacity planning and financial optimization of the bioethanol supply chain under price uncertainty[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2010, 28: 97-102.
- [7] ZAMBONI A, BEZZO F, SHAH N. Supply chain optimization for bioethanol production system in northern Italy: environmentally conscious strategic design[M]// *Computer Aided Chemical Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 2037-2042.
- [8] HUANG Y X, CHEN C W, FAN Y Y. Multistage optimization of the supply chains of biofuels[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(6): 820-830.
- [9] AWUDU I, ZHANG J. Stochastic production planning for a biofuel supply chain under demand and price uncertainties[J]. *Applied Energy*, 2013, 103: 189-196.
- [10] KIM J, REALFF M J, LEE J H, et al. Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(2): 853-871.

- [11] 卢静.施肥量、降雨及坡位对黑土区春玉米产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.
LU J.Effect of fertilizers' rates,precipitations and slope positions on the spring corn yield[D].Harbin:Northeast Agriculture University, 2013.
- [12] 辽宁省统计局.辽宁统计年鉴 2020[M].北京:中国统计出版社,2020.
Liaoning Bureau of Statistics.Liaoning statistical yearbook 2020[M].Beijing:China Statistics Press,2021.
- [13] 任延冬,周静.辽宁省玉米产业发展现状与对策研究[J].农业经济,2009,28(12):37-38.
REN Y D,ZHOU J.Study on the development status and Countermeasures of corn industry in Liaoning Province[J].Agricultural Economy,2009,28(12):37-38.
- [14] EKŞİOĞLU S D,ACHARYA A,LEIGHTLEY L E,et al.Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain [J].Computers & Industrial Engineering,2009,57(4):1342-1352.
- [15] PETERS M S,TIMMERHAUS K D,WEST R E.Plant Design and Economics for Chemical Engineers[M].New York: McGraw-Hill, 2003.
- [16] GALLAGHER P W,BRUBAKER H,SHAPOURI H.Plant size:Capital cost relationships in the dry mill ethanol industry[J].Biomass and Bioenergy,2005,28(6):565-571.
- [17] 辽宁经纬测绘规划建设有限公司编制.辽宁省地图集[M].北京:中国地图出版社,2009.
- [18] 高聪,杨洁,关志民,等.非粮质生物能源供应链优化设计研究:以辽宁地区为研究对象[J].工业工程,2014,17(1):1-7.
GAO C,YANG J,GUAN Z M,et al.Optimal design of non-food bioenergy supply chain;Taking Liaoning area as the subject[J].Industrial Engineering Journal,2014,17(1):1-7.

Bioenergy supply chain optimization design under multi-uncertainty

Gao Cong

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Bioenergy industry mitigates to solve the energy shortage in a certain extent and the pollution which comes from burning straw. A new challenge arises from the changing external conditions against optimizing the design of bioenergy supply chain, which is supposed to be more adaptable to the fluctuation of the conditions such as market demand and raw material supply. These uncertainties are taken into considerations and the problem is formulated as a MILP. The model is to maximize the expected profit and to decide refineries' locations and scales, raw material habitat choosing and the transportation between refineries and customers. The practical data of Liaoning Province are used to prove the effectiveness of this model. The sensitive analysis based on the fluctuation of various elements has been done to test the robustness of the model.

Keywords: uncertainties; bioenergy supply chain; Liaoning area; environment changing

[责任编辑 陈留院 赵晓华]