16/36 1555-1559

# 用 Monte Carlo 方法分析 CGE 模型的不确定性

王 灿, 陈吉宁

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘 要: 采用 Monte Carlo 方法研究可计算一般均衡(CGE)模型参数不确定性传播问题,开发了随机计算工具。通过拒绝法由正态分布的随机数获得 β 分布随机数,并利用拉丁超立方体抽样方法对 TEDCGE 模型的 50 个自由参数进行随机采样,考察模型输出的不确定性。考虑参数的不确定性时,中国 2010 年相对于基准情景减排碳排放量 30%的边际成本的 95%置信区间为(345,600)元/t,相应的国民生产总值(GDP)损失率置信区间为(0.85%,1.35%),GDP 损失总量将在 1415~2270 亿元(2000 年价格)之间。自由参数的相关性将带来显著影响,当参数之间是正的相关关系时,模型结果的不确定性将进一步扩大。

关键词:可计算一般均衡模型;不确定性分析; Monte Carlo 法;碳减排

中图分类号: X 11

ISSN 1000-0054

CN 11-2223/N

文献标识码:A

文章编号: 1000-0054(2006)09-1555-05

# **Uncertainty analysis of CGE model using Monte Carlo method**

WANG Can, CHEN Jining

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A solution method for the stochastic computable general equilibrium (CGE) model was tested using a Monte Carlo method to investigate the uncertainty propagation in CGE models. 50 elasticity parameters in a CGE model were treated as random variables with an assumed  $\beta$  distribution. The variables include the carbon tax rate and the GDP loss corresponding to various carbon reduction levels in China. The analysis shows that the confidence interval of the marginal carbon reduction cost is 345–600 RMB/t using year 2000 prices with 95% confidence when controlling the carbon emissions to 30% lower than the business as usual (BAU) level in 2010. The corresponding confidence level for the GDP loss is 0.85%-1.35% for a total GDP loss of 141.5-227.0 billion RMB in year 2000 prices. The correlations among the uncertainity parameters have much greater effect on the output uncertainty.

Key words: computable general equilibrium (CGE) model;

山方式数据 analysis; Monte Carlo method; carbon emission reduction

equilibrium, CGE)模型近年来作为一种规范的政 策分析工具得到了广泛的应用, 经常用来分析环境 保护、能源、全球气候变化、国际贸易等领域政策对 国家或地区的福利、产业结构、劳动市场、环境状况、 收入分配等方面的影响[1,2]。但是, 受数据的局限, CGE 模型在其参数的可靠性上一直受到来自于计 量经济学家的置疑和批评[3]。CGE 模型最常用的参 数率定过程是以基准年均衡数据为基础的校准方 法[4],这种方法本身无法完全识别 CGE 模型的所 有参数,它必须依赖于"自由参数"的确定⑤。一般 来说,外生干校准方法的自由参数的取值来自干其 他计量经济研究回归估计的结果、或者是在没有数 据支持情况下简单的主观判断[4]。而文献中关于某 些自由参数的专门研究在部门划分、时间跨度、地域 范围等系统边界上往往难以与特定 CGE 的要求相 一致,这就带来了 CGE 模型参数的不确定性。为 此,许多研究分别提出了不同方法来讨论参数不确 定性所带来的模型结果的不确定性[5-8]。但现有方 法主要是描述性的,以单值灵敏度分析(或称局部 灵敏度分析)的应用为主,并没有采用严格的统计 分析框架: 所考察的主要是影响动态结果的外生参 数,缺乏对 CGE 模型自由参数不确定性的系统 分析。

可计算一般均衡(computable general

本文通过 Monte Carlo 随机模拟的方法,借助 Visual Basic 环境下开发的 CGE 模型不确定性计算 工具,对作者所构建的中国经济-环境-能源动态 CGE 模型<sup>[9]</sup> (TEDCGE)自由参数不确定性的传播 进行研究,考察模型结果因参数的概率分布而表现 出的不确定性特征。为便于讨论,本文选取碳税水平

收稿日期: 2005-07-15

基金项目: 国家"十五"科技攻关项目 (2004-BA611B-03)

作者简介: 王灿(1974-), 男(汉), 湖南, 助研。

E-mail: canwang@tsinghua.edu.cn

和 GDP 损失率两个内生变量作为 TEDCGE 模型 众多输出变量的代表进行分析。

## L 计算方法

#### 1.1 分析框架

本文采用 Monte Carlo 方法研究 TEDCGE 模型中 50 个自由参数对碳税政策模拟结果的不确定性影响,分析框架见图 1 所示。

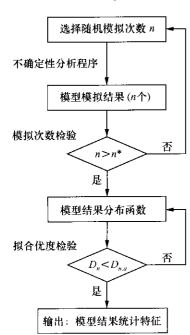


图 1 参数不确定性传播模拟框架

确定随机模拟次数  $n^*$  的过程如下 [6]:令 y 为一个 (r,1) 维的向量,代表模型 r 个输出变量的未知均值,令  $\hat{y}$  为相应的估计值,V 为 y 的协方差矩阵。在中心极限定理条件下, $\hat{y}$  服从均值为 y、协方差矩阵为  $n^{-1}V$  的渐进多变量正态分布,其中 n 是 Monte Carlo 实验的样本大小。令第 i 个变量  $y_i$  的允许误差范围为  $\varepsilon_i$ ,并令  $\sigma_i^2$  为矩阵 V 的第 i 个对角元素,按照下式选择样本大小:

$$n = n_i^* \equiv (z_{\alpha/2}/\varepsilon_i)^2 \sigma_i^2, \qquad (1)$$

其中 $z_{a_i/2}$ 是标准单变量正态分布的临界值。此时,上述允许误差范围可以以  $1-a_i$  的概率得到保证。令

$$n = n^* \equiv \max\{n_1^*, n_2^*, \dots, n_r^*\},$$

则式(1)将确保所有变量的误差范围都以相应的概率得到满足。

估计协方差矩阵 V 的方法如下[10] . 首先基于一个初始样本大小  $n_0$  估计得到 V , 然后通过 V 计算  $n^*$  。如果计算显示  $n_0 \ge n^*$  ,那么最终的随机样本可

以直接由初始的  $n_0$  个样本构成。如果  $n_0$  不满足这一标准,则再增加  $n^*-n_0$  个随机样本并重新计算 V,直到满足  $n_0 \geqslant n^*$  为止。

## 1.2 不确定性参数的概率分布

采用  $\beta$  概率分布函数描述自由参数在某一特定区间的分布特征。该函数的标准形式定义在(0,1) 区间上,可通过线性变化扩展到其他任何有界区间。(0,1) 区间的  $\beta$  密度函数定义为

$$\beta_{\mu,\nu}(x) = \frac{\Gamma(\mu + \nu)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\nu)} x^{\mu-1} (1-x)^{\nu-1},$$

$$0 < x < 1,$$
(2)

式中  $\mu$  和  $\nu$  均为大于零的参数。如果  $\mu$ <1、 $\nu$ <1,则  $\beta_{\mu,\nu}$ 的图形是 U 形,其极限趋于 $\infty$ ;如果  $\mu$ >1、 $\nu$ >1,图形是钟形;如果  $\mu$ = $\nu$ =1,则得到均匀密度分布 (10)。本文通过拒绝法 (11) 由正态分布的随机数获得  $\beta$  分布随机数,并利用拉丁超立方体抽样方法 (11) 对 (50) 个自由参数进行随机采样,

TEDCGE 模型通过 GAMS 软件实现求解。用

## 1.3 计算工具

析时,需要反复执行 GAMS 求解程序,并在执行前对所考察参数按预设的概率分布进行随机采样。为此,本文用 VB 语言编写了一个基于 WINDOWS 操作系统的不确定性计算工具,界面如图 2 所示,源程序参见文[12]。该工具可以很便捷地重复调用执行 GAMS 程序,并可根据需要进行不同情景下的不确

Monte Carlo 方法进行 CGE 模型参数不确定性分



图 2 CGE 模型不确定性计算软件界面

# 2 数据与结果

#### 2.1 模型参数

TEDCGE 模型包括 10 个生产部门。根据 CGE 模型参数的校准方法 [4],其参数可分为 50 个自由 参数  $\delta$ 、130 个被校参数  $\gamma_1$  和 413 个被校参数  $\gamma_2$  [12]。其中, $\delta$  由文 [5,7] 和专家咨询获得, $\gamma_1$  在  $\delta$ 

的基础上,根据基准年构建的社会核算矩阵(social accounting matrix, SAM) 反 推 得 到;而  $\gamma_2$  则 由

SAM 直接计算。本文以 1997 年中国投入产出表为基础结合其他宏观经济、环境、能源数据编制了符合TEDCGE 模型数据结构要求的 SAM, 进而校准得

TEDCGE 模型的 50 个自由参数来自嵌套式生产函数和进出口贸易函数中的 5 类替代弹性,每类替代弹性对应于 10 个生产部门。根据文[12]的调研

## 2.2 参数不确定性

到模型中的所有参数。

结果,本文设定上述替代弹性的不确定性特征如表 1 所示。需要指出的是,受数据可得性的限制,表 1 并非基于中国真实数据的统计结果,而是以文献调研为依据的判断。表 1 中  $E_{\mathrm{ee},j}$ 为能源投入替代弹性;  $E_{\mathrm{ke},j}$ 为资本与能源替代弹性;  $E_{\mathrm{cl},j}$ 为劳动力与资本一能源替代弹性;  $E_{\mathrm{id},j}$ 为进口品与国产品替代弹性;  $E_{\mathrm{ed},j}$ 为出口供应与国内需求转移弹性。下标 j=1, 2,…,10,分别表示模型中所划分的 10 部门。本文的主要目的不在于精确地研究中国经济系统中相应

表 1 TEDCGE 模型自由参数的不确定性特征

参数的不确定性,而在于考察 CGE 模型自由参数不

-	会物	内佔	下阳		标准差		β分布的参数	
	多奴	刁诅	r PK	PIX			μ	ν
	$E_{{ m ee},j}$	1.0	0.5	1.5	0.25	25	1.5	1.5
	$E_{{ m ke},j}$	0.5	0.2	1.4	0.26	40	1.5	2.5
	$E_{{ m cl},j}$	0.5	0.2	0.9	0.18	32	1.5	1.5
	$E_{\mathrm{id},j}$	1.5	0.1	4.0	0.73	42	2.5	3.5
	$E_{{ m ed},j}$	2.5	0.1	4.0	0.73	31	3.5	2.5

#### 2.3 模拟结果的不确定性

确定性的传播特征。

以  $CO_2$  减排率为 30%的情景为例,随机模拟 5000 次,得到图 3 所示的碳税概率分布。重复多次 试验得到的均值和方差变化范围在 1% 以内,表明 5000 次的随机采样次数已经足够。根据图 3 的分布形状,假设碳税服从  $\beta$  分布,经过线性变换将碳税样本值转化成 (0,1) 区间数值后,估计得到  $\beta$  分布的参数  $\mu=3.2$ ,  $\nu=5.6$ 。应用 Kolmogorov-Smirnov的  $D_n$  检验法 [0] 对其进行分布拟合优度检验发现,

 $D_n = 0.0158 < D_{n.0.90} (\approx 0.0174)$ ,因此可以接受碳

税服从  $\beta$  名在約假设(当样本数 n>100、显著性水

平 a=0.10 时,统计量  $D_n$  的分位数可近似地由公

式  $D_{n,0.90} \approx 1.23 / \sqrt{n}$  求得)。由  $\beta$  分布的累积概率 密度函数可得到碳税的置信区间,例如,当显著性水平 a=0.05 时,碳税的置信区间为(344,601)。同理

可以计算得到,减排 30%对中国 GDP 的损失率服 从均值为 1.10%、标准差为 0.13%的正态分布; 当显著性水平 a=0.05 时,其置信区间为(0.85%, 1.35%),相应地,GDP 损失总量将在  $1415\sim2270$ 

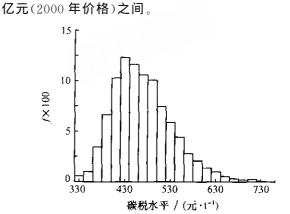


图 3 减少 30 % CO<sub>2</sub> 排放所需碳税水平的随机模拟结果

分别对不同削减率的情景进行类似的随机模拟与统计分析,即可得到一系列的概率分布曲线,进而可以考察参数不确定性对边际减排成本曲线的影响。图 4 绘出了对应于不同削减率的碳税水平的均值、95%置信区间、100%置信区间及相对误差。

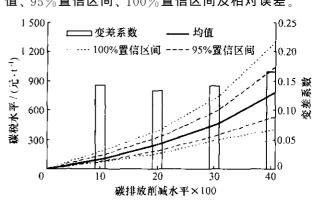


图 4 考虑参数不确定性时的边际减排成本曲线

可以看出,当考虑参数的不确定性时,模型模拟的碳税相应地也具有很大的不确定性;并随着减排目标变得更严格,碳税的不确定性将增大。图中由标准差除以均值得到的变差系数也显示了这一趋势。

# 3 模型结果不确定性特征的敏感性分析

# 3.1 对参数分布方差的敏感性

保持其他假设不变,只改变自由参数的概率分布,分别进行随机模拟,可以比较不同分布方案对模拟结果不确定性的影响。下面考察所有自由参数方

差相对基准情景减少 50%时的  $\beta$  分布以及在相应区间内服从均匀分布的两种情景。图 5 显示了资本 -能源/劳动力替代弹性的 3 种分布函数,方差减半时其  $\beta$  分布的参数分别为  $\mu=3.5$ 、 $\nu=3.5$ 。其他自由参数方差减半时  $\beta$  分布的参数分别为:资本/能源替代弹性  $\mu=3.4$ 、 $\nu=5.7$ ,能源间替代弹性  $\mu=$ 

3.5、 $\nu = 3.5$ ,阿明顿(Armington)进口替代弹性  $\mu = 5.4$ 、 $\nu = 7.6$ ,出口转移弹性  $\mu = 7.6$ 、 $\nu = 5.4$ 。

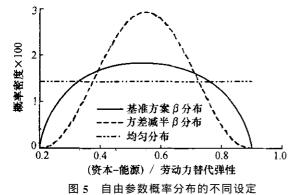


图 6 是在 3 种参数分布方案下利用 TEDCGE

模拟得到的 2010 年减排 30%CO<sub>2</sub> 所需碳税的概率分布。由于方差减半的  $\beta$  分布并未改变参数的均值,而均匀分布时资本/能源替代弹性的均值将会加大,所以前者模拟得到的碳税均值几乎没有变化,而均匀分布方案的均值有所减少。从碳税的标准差来看,方差减半  $\beta$  分布方案的标准差只降低 27%,由基准方案(以碳为标准)的 33 元/t 降低为 24 元/t;均匀分布的标准差为 36 元/t,只有很小幅度的变化。因此,可以认为 TEDCGE 模型输出结果的不确

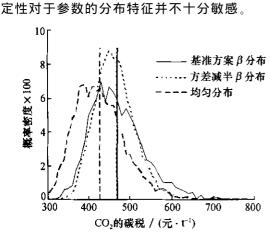


图 6 自由参数的先验分布对模型结果不确定性的影响

# 3.2 参数相关性假设的灵敏度分析

前面分析数据一个重要假设是"所有自由参数 完全独立"。之所以采用如此严格的假设,不是因为 已有相关研究明确地支持或证明这一点,事实上恰恰相反。例如,从理论上说,某一部门某一替代弹性较高时,其技术水平的适应性较强,相应地该部门其他弹性值也可能较大。但是,还没有研究能确切地获得不同替代弹性之间、同一类弹性的不同部门之间的定量相关关系,同时,从数值计算代价上权衡,前文采用了简化的参数完全独立的假设。为弥补这一不足,下面通过两种情景来考察 TEDCGE 模型自由参数不确定性传播特征对参数相关性假设的敏感程度。一种情景是假设不同部门的同一类参数相关,并进一步假设其相关关系为所有部门具有相同的替代弹性,另一情景是所有自由参数都相关,并进一步假设其相关关系体现为在各自 $\beta$ 分布区间内具有相同的变动趋势。其中,完全相关情景的实现方法

图 7 是分别在上述 3 种相关性假设下对 2010 年削减率为 30%的碳税进行随机模拟所得出的概率密度。与参数分布的影响相反,自由参数间的相关性对模型结果影响较大。参数部门间相关时,模型结果的不确定性是参数完全独立时的 2.2 倍,当假设所有参数相关时,这种不确定性进一步扩大为 3.3 倍。这主要是因为所有被考察的自由参数对碳税具有相同方向的作用:替代弹性较大时,减排的边际成本较小,对 GDP 的影响较小,反之亦然。因此,参数之间的相关性将强化替代弹性的作用,从而扩大结果的离散性。

是在 Monte Carlo 采样时所有自由参数都由同一个

随机数通过线性变换生成。

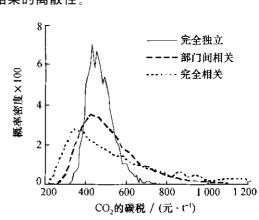


图 7 自由参数之间的相关性对模型结果不确定性的影响

# 4 结 论

考虑参数的不确定性时,中国 2010 年相对于基准情景减排碳排放量 30%的边际成本的 95%置信区间为(345,600)元/t,相应的 GDP 损失率置信区

间为(0.85%, 1.35%), GDP 损失总量将在 1415

亿元~2 270 亿元(2000 年价格)之间。对参数不确定性传播的灵敏度发现,自由参数的分布形式对上述输出结果的统计特征作用不大,而参数间的相关性将带来显著影响。当参数之间是正的相关关系时,模型结果的不确定性将进一步扩大。

### 参考文献 (References)

- [1] Harrison G W, Jensen S E H, Pedersen L H, et al. Using Dynamic General Equilibrium Models for Policy Analysis [M]. Amsterdam; New York; Elsevier, 2000.
- [2] 王灿,陈吉宁,邹骥. CGE 模型理论及其在气候变化研究中的应用 [J]. 上海环境科学,2003,22(3): 206-212.
  WANG Can, CHEN Jining, ZOU Ji. Application of CGE models theory to climate change study [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(3): 206-212. (in Chinese)
- [3] McKitrick R R. The econometric critique of computable general equilibrium modeling: The role of functional forms [J]. *Economic Modelling*, 1998, **15**: 543-573.
- [4] Mansur A, Whalley J. Applied General Equilibrium Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [5] Abdelkhalek T, Dufour J. Statistical inference for computable general equilibrium models, with application to a model of the Moroccan economy [J]. Review of Economics & Statistics, 1998, 80(4): 520-534.

## (上接第 1554 页)

# 3 结 论

- 1) 以产物的营养价值和传热效果为评价指标,餐厨垃圾湿热工艺适宜的工艺参数为: 温度 120 °C、加热时间 80 min、加水率 50%。
- 2) 各因素对餐厨垃圾湿热处理产物的 pH 值、SCOD、还原糖含量、有机质含量的影响显著性从高到低的顺序为: 温度、加热时间、加水率。对总能影响较显著的因素为加水率和温度。
- 3)随着温度的升高和加热时间的延长,垃圾中蛋白质、脂类水解产生有机酸,造成产物的 pH 值呈下降趋势;部分有机物溶解、液化,造成可溶性有机物含量增多;因垃圾中的碳水化合物液化、水解,与原垃圾相比,产物还原糖含量有所升高;有机质、总能等营养指标变化不显著;持水率呈下降趋势,说明湿热处理一定程度上可增强产物脱水性能。

万方数据

- [6] Abler D G, Rodríguez A G, Shortle J S. Parameter uncertainty in CGE modeling of the environmental impacts of economic policies [J]. *Environmental and Resource Economics*, 1999, **14**(2): 75 94.
- [7] Papathanasiou D, Anderson D. Uncertainties in responding to climate change: On the economic value of technology policies for reducing costs and creating options [J]. The Energy Journal, 2001, 22(3): 79-114.
- [8] Harrison G W, Vinod H D. The sensitivity analysis of applied general equilibrium models: Completely randomized factorial sampling designs [J]. Review of Economics and Statistics, 1992, 74(2): 357-362.
- [9] 王灿,陈吉宁,邹骥.基于 CGE 模型的中国 CO<sub>2</sub> 减排经济影响研究 [J].清华大学学报(自然科学版),2005,45(12):1621-1624.
  WANG Can, CHEN Jining, ZOU Ji. Impacts assessment of CO<sub>2</sub> mitigation to China's economy bsed on a CGE mdel [J].
  J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2005,45(12):1621-1624. (in Chinese)
- [10] Evans M, Hastings N, Peacock JB. Statistical Distributions [M]. New York: Wiley, 2000.
- [11] Gentle J E. Random Number Generation and Monte Carlo Methdos, Statistics and Computing [M]. New York: Springer, 1998.
- [12] 王灿. 基于 CGE 模型的中国气候政策模拟与分析 [D]. 北京:清华大学, 2003.

  WANG Can. Climate Change Policy Simulation and Uncertainty Analysis: A Dynamic CGE Model of China [D].

  Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)

#### 参考文献 (References)

- [1] Therese M. Research competencies in the dietetics curricula [J]. Journal of the American Dietetic Association, 1997, 97(Suppl 2): 102-106.
- [2] Henle T. Maillard reactions of food proteins; Chemical, nutritional and functional aspects [J]. Nahrung-Food, 2001, 45(3): 149-149.
- [3] 王治军,王伟,夏州,等. 热水解污泥的厌氧消化试验研究 [J]. 中国给水排水,2003, 19(9): 1-4. WANG Zhijun, WANG Wei, XIA Zhou, et al. Experimental study on thermal hydrolysis and anaerobic digestion of sewage sludge [J]. China Water and Wastewater, 2003, 19(9): 1-4. (in Chinese)
- [4] Shanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment [J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 129-135.
- [5] Slot M. Conditions of the maillard reaction: Modelling of the process [J]. Inzynieria Chemicznai Procesowa, 1997, 18(1): 71-82.
- [6] Martins S, Jongen W M F, van Boekel M. A review of maillard reaction in food implications to kinetic modeling [J]. Trends in Food Sci Technol, 2000, 11(9-10): 364-373.