

我国能源消费与 CO₂ 排放的系统动力学预测^{*}

秦 钟 章家恩^{**} 骆世明 叶延琼

(华南农业大学农学院 广州 510642)

摘 要 目前我国正处在全面建设小康社会的重要发展阶段。在人口总量增加、经济持续发展、居民生活能源消费不断提高的情况下,对能源供需状况进行科学、合理的预测对保障我国能源供给、促进经济可持续发展和 CO₂ 减排,实现社会可持续发展具有重要意义。本文在研究我国现阶段能源消费和人口、经济发展现状的基础上,运用系统动力学模型预测了我国能源需求和 CO₂ 排放量,提出能源发展和削减 CO₂ 排放量的设想和对策。

关键词 能源消费 CO₂ 排放 系统动力学 STELLA 模型

中图分类号: TK01 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671–3990(2008)04–1043–05

Prediction of energy consumption and CO₂ emission by system dynamics approach

QIN Zhong, ZHANG Jia-En, LUO Shi-Ming, YE Yan-Qiong

(College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract China is in the process of constructing an all-round, well-off society. Under the current circumstances of growing population, increasing economic development and daily energy consumption, a realistic forecast of energy demand and supplement is of particular importance for guaranteed energy supply, progressive economic development and limited CO₂ emission for a sustainable development of the society. By analyzing the mode of energy consumption and population and economic development, we predict energy demand and CO₂ emission in the new periodical with system dynamics approach, and then advance suggestions and countermeasures for energy development and released CO₂ limit.

Key words Energy consumption, CO₂ emission, System dynamics approach, STELLA model

(Received Nov. 1, 2007; accepted Dec. 31, 2007)

能源是我国国民经济的基础,也是影响人类生存环境的重要因素。近年来,随着我国经济持续快速发展和生活水平的不断提高,居民生活能源消费随着人口增长、工业化和城市化而稳定增长,人均能源消耗不断上升。与此同时,我国以矿物燃料为主的能源结构在相当长一段时间仍占主导地位,持续攀升的能源消耗和温室气体排放量使我国的能源发展面临更加严峻的挑战。

能源系统是一个复杂的非线性系统,人口增长、经济发展、科技进步和国家的宏观政策等都将直接影响能源系统的发展。另一方面,能源的供求结构、能耗强度、能源效率等对社会、经济和环境也起着重要作用。本研究运用系统动力学模型分析了我国 GDP 增长、产业结构调整与能源消费总量及

煤炭、石油、天然气、水电消费量之间的因果反馈关系,并对我国能源需求和 CO₂ 排放量进行预测,以期为我国能源规划和计划的制定、节能目标的确定和措施的选择以及能源消费结构的调整等提供科学依据。

1 研究方法步骤

1.1 边界确定

人口增长是决定能源需求的传统因素,较高的人口增长率会增加能源的消费需求量。近年来,随着生活水平的不断提高,居民生活能源消费将随着人口增长、工业化和城市化而稳定增长,人均能源消耗也会继续上升^[1]。因而在构建能源系统预测模型时,将人口数量作为一个重要影响因素。考虑到产业结构、经济增长与能源消费之间的关系,本

^{*} 广东省软科学研究项目(2006B70103029)和华南农业大学校长基金项目(4100–K06327)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

秦钟(1973~),女,博士,讲师,主要研究方向为生态系统分析与模拟。E-mail: q_breee@126.com

收稿日期:2007–11–01 接受日期:2007–12–31

研究从国民经济三大产业结构入手,分析第一、第二、第三产业及居民生活能耗的各自特点和发展趋势,将这 4 者的加和作为全社会能源的总消费,并计算和预测每一产业结构的能耗及其所占比例。同时,为便于估算能源消费过程中 CO₂ 的排放量,本研究构建模型时,将能源终端消费按能源来源分为电力消费和化石燃料直接消费两部分,并将其进一步划分成煤炭、石油、天然气、水电、核电 5 个子系统,各产业部门分别对这 5 类能源的消耗量之和即为全社会对这 5 个子系统的消耗量,由此可得这 5 类能源所占总能耗的比例在未来一段时间内的变化情况,从而更清楚地反映燃料消费(包括电力消费)过程。

1.2 模型构建

依据能源、人口与经济子系统间的相互联系、相互制约关系及其动态变化特征和影响能源需求的发展指标目标的设定,构造能源-经济-人口系统相互作用的基本结构和反馈回路,并建立相应的概念模型(图 1)。

模型共包含 4 个状态变量、4 个速率变量和多个辅助变量及常量。人均能源(煤炭、石油和天然气)消费量、三大产业的比重、按行业分能源消费强度等均为随时间变化的表函数(共计 16 个)。研究中所用数据如能源消费、产业产值和人口数据等,如无特别说明,均来自《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、中宏网与中经专网的原始数据。

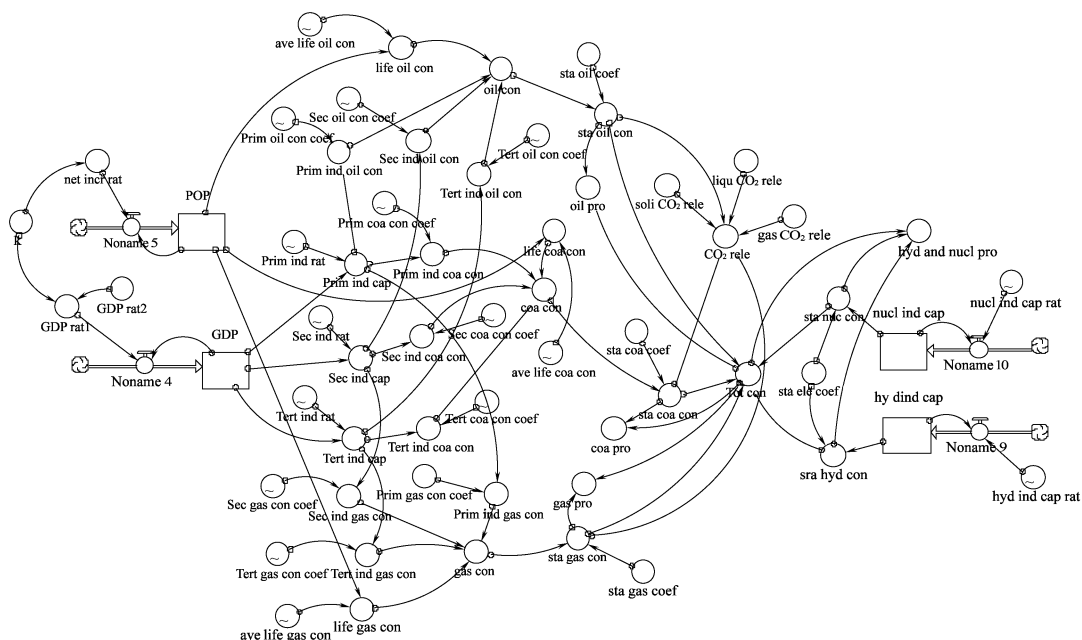


图 1 我国能源-经济-人口系统的 STELLA 模型

Fig. 1 Model of energy-economy-population complex system built in STELLA

图中的主要变量第一、二、三产业分别用 Prim, Sec 和 Tert 代替,本文仅列出与第一产业有关的变量,第二、三产业变量与此类似。

Prim ind cap—第一产业固定资产投资;Prim ind coa con—第一产业耗煤量;Prim coa con coef—第一产业耗煤系数;ave daily coa con—生活日平均耗煤量;Prim oil con con—第一产业消耗石油量;Prim oil con coef—第一产业耗油系数;Prim gas con con—第一产业消耗天然气量;Prim gas con coef—第一产业耗气系数;hyd ind cap—水能;nucl ind cap—核能;coa con—煤炭消耗量;gas con—天然气消耗量;POP—人口数量;oil con—石油消耗量;Tot ene con—总能耗;ene per GDP—单位 GDP 能耗;CO₂ rele—总 CO₂ 排放量。

1.3 人口和经济增长目标的设定

假定我国现有的能源消费结构和强度保持不变,根据“十一五”时期经济社会发展的人口指标,我国总人口将由 2005 年的 13.08 亿增加至 2010 年的 13.60 亿,年均增长率不能超过 8‰,2020 年总人口不超过 14.5 亿。另据国务院发展研究中心对外经济研究部对我国未来经济发展前景进行的预测,2006~2010 年,我国经济将持续保持快速增长,年均经济增长速度将保持在 8% 左右;2010~2020 年,

我国经济增长的速度会有所放慢,年均经济增长速度将保持 7% 左右。为便于研究,本研究认为在我国宏观发展政策的引导和约束下,人口的净增长率和 GDP 增长速率均符合负指数增长曲线,可用下式表示:

$$I = I_0 [1 - \exp(-kt)] \quad (1)$$

式中, I_0 代表我国人口或经济政策实施之前的人口净增长率或 GDP 增长速率; I 表示政策实施后某一时间人口净增长率或 GDP 增长速率; t 为政策开始

实施到现在的时间; k 是描述人口或 GDP 增速达到稳定的时间, k 值越大,表示人口数量或 GDP 越快地趋于稳定。本研究中假设到 2050 年,我国的人口数量 and 经济发展基本保持稳定,即 k 取 45 年。

煤炭、石油和天然气的 CO₂ 排放系数由文献 [2] 获得。由于固体燃料的固碳率为 0.02%,液体为 1.47%,气体为 1.7%。因此,在计算上述 3 种化石燃料各自的 CO₂ 排放量时,用其消费量与相应的固碳率和 CO₂ 排放系数的乘积求得。

1.4 模型运行

以 2006 年我国能源、经济和人口系统为初始状态,收集初始状态的已知数据,同时将 1990~2005 年的三大产业产值、人均生活能源消费量及根据 1995~2005 年“分行业能源消费总量和主要能源品种消费量”计算得到的消费强度等作为输入数据,利用系统动力学模拟软件 STELLA (Strongly-TypEd, Lisp-like LAnguage, 简称 STELLA) 进行仿真,运行时间段为 2006~2050 年,每隔 4 年输出 1 次数据,结果以图或表的形式展示。

2 预测结果

由表 1 可知,2006 年我国能源消费总量折合近 23.85 亿 t 标准煤,2010 年和 2050 年将分别达到 27.68 亿 t 标准煤和 136.25 亿 t 标准煤,年均增长率为 3.43%。其中,煤炭的消费量将由 2006 年的 24.71 亿 t 标煤增加到 2010 年、2050 年的 28.64 亿

t 标煤和 127.81 亿 t 标煤,年均增长率为 3.22%;石油的消费量年均增长率略低于煤炭;天然气的消费量将由 2006 年的 592.48 万 t 标煤增加到 2010 年、2050 年的 670.81 万 t 标煤和 2 609.5 万 t 标煤,年均增长率为 2.87%;核电和水电的年增长率几乎相等,约为 9.84%。可见,未来的能源消费中,煤炭的增长速度最高(图 3)。从能源消费类型所占比例来看,煤炭、石油和天然气在总消费量中所占比例将随时间呈逐年下降的趋势。与 2006 年相比,2010 年和 2050 年煤炭消费的比重将分别下降 0.13 和 9.4 个百分点,石油和天然气消耗所占比例将分别由 2006 年的 21.9%、3.3% 分别降至 2050 年的 19.8% 和 2.5%。与之相反的是水电和核电,两者的消耗量之和所占比例将由 2006 年的不足 1% 上升至 2050 年的 10.6%。

我国自 20 世纪 70 年代开始实行计划生育政策以来,通过全社会的不懈努力,我国人口出生率从 1970 年的 33.43‰ 下降到 2006 年的 12.09‰,尽管如此,2000 年我国人口数已达 12.7 亿,2006 年突破了 13 亿,如按国家对人口增长继续进行严格控制的政策,未来一段时间内我国人口的年均增长率将略有下降,但人口总量仍呈增加趋势,2020 年将达 14.27 亿,2050 年将增至 17 亿左右(图 2)。与之相应的,全国能源消费总量、居民生活能源消费量均处于高增长时期(图 3)。在未来 45 年的时间里,人

表 1 我国能源需求预测结果
Tab. 1 Prediction results of energy consumption and its structure in China

年份 Year	煤炭 Coal (10 ⁴ t)	石油 Petroleum (10 ⁴ t)	天然气 Natural gas (10 ⁴ t)	核电 Nuclear power (10 ⁸ kW·h)	水电 Hydro power (10 ⁸ m ³)	总能耗 Total energy consumption (10 ⁴ tons standard coal)
2006	247 146.10	36 622.71	592.48	548.43	4 357.86	238 511.19
2010	286 441.20	42 436.84	670.81	818.18	6 501.29	276 800.96
2014	332 151.56	49 199.97	761.55	1 220.60	9 698.98	321 623.40
2018	385 328.59	57 067.62	866.72	1 820.96	14 469.45	374 189.91
2022	447 196.13	66 220.83	988.67	2 716.60	21 586.31	435 979.83
2026	519 178.69	76 870.31	1 130.15	4 052.78	32 203.63	508 818.39
2030	602 934.40	89 261.34	1 294.33	6 046.15	48 043.10	594 984.36
2034	700 393.32	103 679.43	1 484.95	9 019.97	71 673.29	697 360.14
2038	813 801.99	120 456.87	1 706.32	13 456.48	106 926.08	819 643.97
2042	945 775.38	139 980.49	1 963.47	20 075.11	159 518.10	966 652.44
2046	1 099 357.30	162 700.54	2 262.26	29 949.13	237 977.69	1 144 755.70
2050	1 278 090.71	189 141.10	2 609.50	44 679.72	355 027.96	1 362 507.79

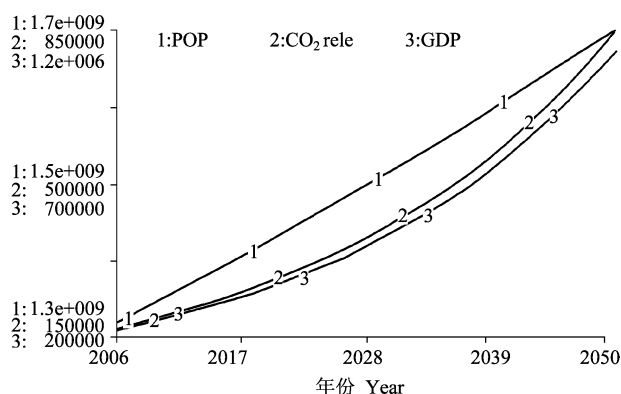


图 2 人口、GDP 与 CO₂ 排放量趋势图

Fig. 2 Trends of population, GDP and emission of CO₂

caused by energy consumption in China

人口数量、CO₂ 排放量及 GDP 单位分别为人、

万 t 和万元。Units of human population, release CO₂

amount and GDP are person, 10 000 t and

10 000 RMB, respectively.

均能源消费量将由 2006 年的 1.815 t 标准煤上升至 1.876 ~ 2.928 t 标准煤,该结果与采用时间序列法、灰色系统预测法等所得结果和相关报道^[3-6]基本一致。随着人民生活水平的提高和居民消费结构的升级,对能源的消费需求也将进一步增大。

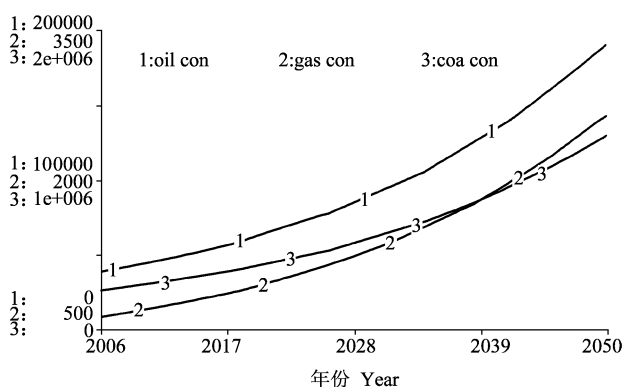


图 3 未来我国煤炭、石油和天然气需求量趋势

Fig. 3 Trends of coal, petroleum and natural

gas consumption in China

石油、天然气及煤炭消耗量单位均为万 t。

Units of petroleum consumption, natural gas consumption

and coal consumption are 10 000 t.

改革开放以来,我国一直保持较高的经济增长速度。从 2003 年开始,我国经济增长率一直在 10% 平台上加速,2006 年我国 GDP 达 21.09 亿元,模拟结果显示(图 2),未来我国的经济继续保持增长势头,2010 年、2050 年 GDP 将增至 24.55 亿元和 112.07 亿元。从单位 GDP 能耗值看,从 2003 年到

2005 年,我国连续 3 年单位 GDP 能耗上升,上升速率分别为 4.9%、5.5% 和 0.2%,2006 年降低了 1.33%,是在连续 3 年上升之后呈现的下降,单位 GDP 能耗为 1.206 t 标准煤·万元⁻¹。如果现有的能源消费质量和结构得不到提高和改善,我国单位 GDP 能耗将出现 2025 年前的略有上升到之后的缓慢上扬,至 2050 年单位 GDP 能耗会增至 1.32 t 标准煤·万元⁻¹(图 4),同时对国民经济的增长产生一定的影响。由预测结果可知,2007 ~ 2020 年,人均国内生产总值年均增长仅达 3.4%,要实现 2020 年人均国内生产总值比 2000 年翻两番的目标还需很大努力。由此可见,国家对单位 GDP 能耗降低指标实行计划管理和法律效力约束已刻不容缓。

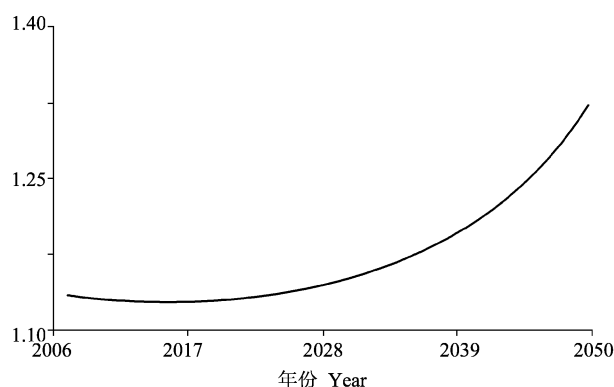


图 4 我国单位 GDP 能耗变化趋势图

(t 标准煤·万元⁻¹)

Fig. 4 Trends of energy used per unit of GDP in China

(Unit: Tons of standard coal equivalent per 10 000 RMB)

由图 2 还可看出,随着我国经济的持续高速发展和人口的增长,能源需求量不断增加,未来几十年 CO₂ 的排放量也呈增长趋势。在不考虑能源结构调整和可能的技术进步(包括能源利用效率和节能减排技术的提高等)因素的影响下,2005 年我国因化石燃料消费所排放的 CO₂ 总量为 16.28 亿 t,到 2020 年,我国能源活动产生的 CO₂ 排放量 28 亿 t 碳范围内,年平均增长率约为 3.2%,明显低于同期 GDP 的增长率。就人均 CO₂ 排放量来看,我国在 2020 年前,人均 CO₂ 排放量仅为 1.239 ~ 1.972 t 碳,不到发达国家的 1/5,也低于 1997 年世界人均化石燃料燃烧排放 CO₂ 量(3.97 t)。

3 讨论和结论

根据本研究的预测结果,2010 年我国能源总需求量为 27.68 亿 t 标准煤,这与我国 2010 年一次能源消费总量控制目标为 27 亿 t 标准煤左右、年均增

长4%的数值相吻合。未来我国能源消费仍以煤炭为主,能源消耗总量中,2010年煤炭、石油、天然气和一次电力之比约为73:22:3:2,表明我国能源利用的结构性问题并未发生根本性转变。正如有学者所指出的,我国能源消费质量提高和结构改善所面临的挑战远远大于数量增长,能源消费结构演进及相应的供应结构改善将成为21世纪国家能源安全的关键。

在不采取强化节能措施和提高能效的政策下,未来一段时间内我国的能源消费水平总体上接近既定的目标,但单位GDP能耗的降幅非常缓慢,在2025年前后甚至会出现小幅上扬。我国在“十一五”规划纲要中,提出2010年单位GDP能耗降低20%左右的目标,就目前看来,高耗能产业在经济增长中仍将占有较大比重,转变能源生产和消费模式,提高能源效率和推进节能技术进步成为一项长期而艰巨的任务。如果在现有基础上,从我国产业结构调整和技术、管理水平提高潜力看,经过努力,实现上述目标是可能的。

我国已通过控制人口增长速度,开发利用核能、水电和其他可再生能源等非化石燃料,植树造林等多方面的努力,为减缓全球温室气体排放的增长速度做出了世界公认贡献。特别是近年来我国电力工业的快速发展,使电力能源消费在一次能源消费中的比重不断提高,水电和核电两者的消耗量之和所占比例将由2006年的不足1%上升至

2050年的10.6%,将会大大减少化石燃料直接燃烧利用产生的CO₂排放。

目前我国的产业结构仍属“二、三、一型”产业结构,与发达国家相比,产业结构水平仍很低。如果不节能减排和进行产业结构调整,我国碳排放总量2010年将达到19亿t,成为世界第一排放大国。因此,我国未来的碳排放形势仍相当严峻,必须通过优化产业结构,不断提高高新技术产业和第三产业的比例,改善能源结构,提高水电、核能、太阳能及生物能等清洁能源比例,提高能源利用效率,为在一定程度上削减CO₂的排放量提供保障。

参考文献

- [1] 吴玉鸣. 省域人口、经济增长与能源消费的面板数据分析[J]. 资源科学, 2007, 29(11): 1-5
- [2] 穆海林, 宁亚东, 近藤康彦, 等. 中国各地域能源消费及SO₂、NO_x、CO₂排放量估计与预测[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(6): 674-679
- [3] 郎一环, 王礼茂, 顾鹏. 全面建设小康社会的能源合理利用与CO₂减排[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 118-124
- [4] 潘双庆. 从供需状况看我国的能源危机[J]. 决策参考, 2005(12): 43-44
- [5] 张抗, 周总瑛. 从油气需求看我国未来能源消费结构特征[J]. 山西能源与节能, 2000(4): 5-9
- [6] 韩可琦, 王玉浚. 中国能源消费的发展趋势与前景展望[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 1-5