

中国能源消费排放的 CO₂ 测算

周 伟,米 红* (浙江大学非传统安全与和平发展研究中心,浙江 杭州 310058)

摘要: 基于“能源-经济-环境”的 MARKAL-MACRO 模型和数理人口学中的 Keyfitz 模型,测算未来中国能源消费需求;考虑能源效率、能源结构的变化以及气候变化问题的约束,设定了能源消费的 3 种情景,并分别测算了 CO₂ 排放量.结果表明,在基准情景下,中国的 CO₂ 排在 2042 年达到峰值,为 118.47 亿 t;在能源结构优化情景下,CO₂ 排在 2036 年达到峰值,为 107.53 亿 t;在气候变化约束情景下,CO₂ 排在 2031 年达到峰值,为 94.72 亿 t,相对于基准情景,排放峰值降低了 23.75 亿 t,且峰值时间提前 11a.随着城市化与工业化的推进,电力、水泥、钢铁行业的碳排放将先上升后下降;由于机动车保有量的增加,交通运输业的碳排放将持续上升.

关键词: CO₂ 排放; 气候变化; MARKAL-MACRO 模型

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2010)08-1142-07

Calculation on energy-related CO₂ emissions in China (2010~2050). ZHOU Wei, MI Hong* (Center for Non-Traditional Security and Peaceful Development Studies, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China). *China Environmental Science*, 2010,30(8): 1142~1148

Abstract: On the basis of MARKAL-MACRO model of “Energy-Economy-Environment” system and Keyfitz model of demography, energy demand in China in the future was calculated. Three scenarios were put forward taking into account of energy efficiency, energy structure and restriction of climate change. CO₂ Emissions in China will reach peak value 11.85 Gt in 2042 in reference scenario; 10.75 Gt in 2036 in optimized scenario; and 9.47 Gt in 2031 in restriction scenario of climate change. Compare with reference scenario, carbon emissions in restriction scenario of climate change will decline by 2.38 Gt, and peak time will be 11 years earlier. With the development of urbanization and industrialization, carbon emissions from electric power, cement, steel will rise gradually then go down; but emissions from traffic will go up continuously because of the increase of vehicle fleet.

Key words: CO₂ emissions; climate change; MARKAL-MACRO model

中国对自身 CO₂ 排放量的控制,直接影响到全球温室气体减排的效果.在《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)和《京都议定书》的约束下,目前已有 23 个缔约方已经达到 CO₂ 排放峰值并处于逐步下降状态^[1].中国需要尽快确定达到 CO₂ 排放峰值的时间以及峰值的具体数额,并承担相应的国际责任.

化石能源消费是 CO₂ 的最大来源.国际上对“能源-经济-环境”的研究理论与方法已较为成熟,立足于对能源供应、能源需求、能源转化技术、经济与环境诸多模块的综合集成^[2-11].对中国而言,由于处于快速城市化与工业化过程中,新增城市人口对建材、电力、石化、耐用消费品及各类公共基础设施的需求大幅增加,经济结构、能

源结构变化较快,而且变化规律不同于已完成城市化与工业化、经济社会结构相对稳定的发达国家,现有的基于发达国家的“能源-经济-环境”模型难以准确描述这一背景下的能源消费与 CO₂ 排放规律.从城市化、工业化角度分析能源消费的研究中,多是人为设定城市化水平的参考情景,缺乏人口统计学的理论支撑^[12-15].本研究以 MARKAL-MACRO 模型为基础,从工程技术角度与经济角度建立中国能源消费的模型.同时,考虑到中国人口增长、城市化与工业化的特点,在

收稿日期: 2009-11-15

基金项目: 教育部哲学社会科学重大项目(08JZD0021-D); 国家社会科学基金重点项目(08ASH006); 国家人口计生委“十二五”规划项目

* 责任作者, 教授, spsswork@163.com

Keyfitz 模型的基础上建立中国城市化的定量分析模型,对未来中国 CO₂ 的排放量进行测算。

1 研究方法

国际上有关“能源-经济-环境”的研究模型有基于经济学视角的 Top-Down Model^[2],基于工程视角的 Bottom-Up Model^[3],以及集成这 2 种思想的 Mixed Energy Model^[9]。MARKAL-MACRO 模型即为混合能源模型的一种,是一种考虑能源系统与宏观经济的非线性动态规划模型^[9]。本研究以 MARKAL-MACRO 模型为基础,考虑城市化与工业化对宏观经济与能源消费的影响,预测未来社会的能源消费;进一步考虑能源效率与结构的改变,对 CO₂ 排放量进行测算。

1.1 MARKAL-MACRO 混合能源模型

MARKAL-MACRO 模型是一个非线性动态规划模型,耦合了 MACRO 模型与 MARKAL 模型。MACRO 模型是宏观经济模型,该模型中集成了新古典主义宏观经济学的增长理论,其生产函数是以“柯布—道格拉斯函数”为基础建立的。

$$Y(t)=[aK(t)^{\alpha_{kps}}L(t)^{\alpha(1-kps)}+\sum_{dm\in DM}b_{dm}D_{dm}(t)^{\rho}]^{1/\rho} \quad (1)$$

$$L_0=1,L(t)=[1+grow(t-1)]^nL(t-1) \quad (2)$$

$$\rho=1-\frac{1}{ESUB} \quad (3)$$

式中:Y(t)为周期t内每年总产出;a、b_{dm}为生产函数的系数;K(t)周期t内每年的资本要素投入;L(t)为周期t内每年劳动要素投入;dm为能源服务需求部门分类;DM为能源服务需求部门的集合;D_{dm}(t)为周期t内每年dm部门的能源服务需求,grow(t)为周期t内每年的经济增长率;n为每个规划周期的年数;ESUB为能源服务需求对资本和劳动力投入的替代弹性;kps为资本增加值在总增加值中的比例。

MARKAL-MACRO 模型的效用函数如下:

$$UTILITY=\sum_{t=1}^{T_e-1}udf(t)\lg C(t)+udf_{T_e}/[1-(1-udf_{T_e})^n] \quad (4)$$

$$udf(t)=\prod_{\tau=0}^{t-1}[1-udr(\tau)]^n \quad (5)$$

$$udr(t)=kps/kgdp-depr-grow(t) \quad (6)$$

式中:C(t)为周期t内每年总消费;udr(t)为周期t内效用贴现率;udf(t)为周期t的效用贴现因子;kgdp为基年的资本与国内生产总值之比;depr为折旧率;T为规划期所有周期的集合,T_e为最后一个规划期。按照中国现有的效用贴现水平、固定资产投资率、折旧率设定分阶段的参数值,并应用到模型中。

化石能源燃烧排放的 CO₂ 的测算:

$$M=\delta\sum_{i=1}^7e_ih_iE\theta_i \quad (7)$$

式中:M为CO₂的总排放量;θ_i为能源i在能源结构中的比重,其中i=1,2,⋯,7,分别表示煤炭、石油、天然气、水电、核电、风电、太阳能;e_i为单位能源i消耗时产生的CO₂排放量;h_i为燃料i的氧化率;δ为单位标准燃料产生的热能,对于标准油(toe),δ=4.187×10⁷kJ,对于标准煤(tce),δ=2.091×10⁷kJ。

按照不同行业能源消费及碳排放特征进行划分,以电力、水泥、钢铁、化工、交通运输为碳排放的主要部门,此外为农业、生活以及其他。值得注意的是,水泥行业的碳排放除来自于能源消耗外,原料的分解(主要指碳酸盐)也会释放出较多的CO₂。因此在计算时要同时考虑分解效应,计算方法如下:

$$F=\sum_{i=1}^2\frac{D}{D_i}\cdot\lambda_i\cdot\eta \quad (8)$$

式中:F为生产1t水泥,原料分解释放的CO₂的质量;D、D₁、D₂分别是CO₂、CaO、MgO的相对分子质量;λ₁、λ₂是普通硅酸盐熟料中CaO、MgO的含量;η是水泥中熟料的配比^[16]。

1.2 模型情景的设定

影响碳排放的主要因素有人口规模、城市化水平、经济增长速度、产业结构、一次能源构成、单位产值能耗等。其中,人口的变化规律(如出生、死亡)相对稳定,城市化水平可以利用数理人口学方法测算,其余变量需要在不同情境下设定不同的参考数值。

情景 A 为基准情景,依据中国的经济发展在 21 世纪中叶达到中等发达国家水平的目标设定

宏观经济变量,产业结构的重型化在2020年达到最高,此后第三产业比重成为主导产业.由于第三产业不以能源的大量消耗为前提条件,将逐渐降低经济发展对能源的依赖.单位产值的能耗水平依据《节能减排综合性工作方案》^[17]的目标(万元国内生产总值能耗将由2005年的1.22t标准煤下降到2010年的1t标准煤以下,降低20%左右)进行设定,并认为单位产值能耗在2010年以后仍然继续下降,但下降速度有所放缓.

情景B为能源结构优化情景.煤炭在一次能源结构中的比重由目前的接近70%下降到2050年的50%,石油的进口依存度控制在60%以内,非化石能源的比重从目前的10%上升到2020年的15%^[18].在此基础上,设定2030年的非化石能源比重20%,2050年为30%.水电的开发利用由于受到自然条件、生态环境的约束,在2035~2040年将达到最高值,具有经济可行性的水电开发完毕.

情景C为气候变化约束情景.按照政府间气候变化专门委员会(IPCC)的报告^[19],要使得大气中温室气体排放量稳定在较低水平,全球排放量必须在2020~2025年内达到峰值,并在2050年降低到2000年排放水平的一半.中国的发展阶段使得中国不可能在2025年之前达到排放峰值,但有效的节能减排有可能使峰值时间有所提前.在情景B的基础上进一步降低单位产值能耗,并提高核能和可再生能源的比重,使煤炭在一次能源结构中的比重降低到2050年的40%左右.

1.3 人口规模与城市化的测算

中国的能源消费受城市化的直接影响.目前每年有一千多万人口从农村迁移入城市,增加了对城市住房、道路、交通、供水、供电、供热及其他基础设施的需求,收入的提高增加了对家用汽车等耐用消费品的需求,这些都会增加相应的能源消费,从而促使CO₂排放的增加.

人口规模的变化具有相对稳定的特点.在数理人口学中,根据人口平衡方程^[20]可以预测未来分城乡、分性别、分年龄的人口,以城市女性人口为例:

$$P_F(t+1,x+1)=P_F(t,x)-D_F(t,x)+I_{FI}(t,x)-I_{FO}(t,x) \quad (9)$$

式中: $P_F(t,x)$ 为 t 年 x 岁的女性人口数; $D_F(t,x)$ 为 t 年 x 岁死亡的女性人口数(用生命表模型测算); $I_{FI}(t,x)$ 为迁入本地区人数; $I_{FO}(t,x)$ 为迁出本地区人数.对于新出生0岁人口,采用总和生育率模型^[21]测算.

$I_{FI}(t,x)-I_{FO}(t,x)$ 为净迁移入人数.采用Keyfitz 定量描述人口迁移与城市化的迁移模型^[22],该模型的形式如下:

$$\begin{cases} \frac{dP_r(t)}{dt}=(r-m)P_r(t) \\ \frac{dP_u(t)}{dt}=mP_r(t)+uP_u(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_r(t)$ 和 $P_u(t)$ 分别为 t 时刻的农村与城市人口; r 为农村人口的自然增长率; u 为城市人口的自然增长率; m 为农村人口迁移率(净迁出率).

定义 $\Phi(t)$ 为城市化率,则

$$\Phi(t)=\frac{P_u(t)}{P_r(t)+P_u(t)} \quad (11)$$

作者在文献[23]中对人口城市化模型进行了详细论证,并对未来城市化水平进行了测算,测算结果见表1.

表 1 未来城市化水平的测算
Table 1 Calculation of future urbanization rate

年份	总人口 (百万)	城市人口 (百万)	农村人口 (百万)	城市化率 (%)
2010	1349	630	719	46.7
2015	1389	712	678	51.2
2020	1421	784	637	55.2
2025	1442	843	599	58.5
2030	1455	890	565	61.1
2035	1459	923	536	63.3
2040	1452	943	509	64.9
2045	1432	948	484	66.2
2050	1405	944	461	67.2

测算表明,按照中国现有的人口死亡及生育水平,2036年中国人口将达到峰值,约14.6亿人,之后缓慢下降.未来城市化水平将不断提高,2014年城市人口将超过农村人口.按照现有模式发展,2050年的城市化率能达到67.2%.随着农村与城市人口的此消彼长,每年迁移到城市的人口将逐渐减少,从2010年的一千多万降低到2050

年的四百多万;城市化速度也降低到每年 0.3%。 洁能源比重要达到 40%左右。

2 CO₂ 排放的测算结果

2.1 不同情景下的 CO₂ 排放

在基准情景下,中国的 CO₂ 排在 2042 年达到峰值,为 118.47 亿 t.由表 2 可见,电力行业的碳排放始终占据最大份额,这是由于电力行业在未来相当长的时期内仍将高度依赖煤炭.水泥、钢铁、化工行业的碳排放先上升后下降,即在工业化后期,重工业比重下降.交通运输、农业、生活领域的碳排放持续增加,原因在于随着生活水平的提高,家电、机动车等消费品拥有率上升,农业领域能源投入取代劳动力投入等。

表 2 情景 A 的 CO₂ 排放(×10⁸t)

Table 2 CO₂ emissions for scenario A (×10⁸t)

行业	2010	2020	2030	2040	2050
电力	25.50	35.07	41.03	40.18	35.58
水泥	10.12	11.25	10.57	9.94	7.58
钢铁	7.47	8.93	7.95	6.59	4.39
化工	4.63	7.41	6.44	6.17	3.92
交通运输	5.36	8.24	11.59	14.68	15.37
生活	7.12	11.37	12.38	14.78	14.92
农业	2.14	2.81	4.27	5.30	5.67
其他	5.51	10.20	15.44	18.79	19.22
总计	67.86	95.29	109.67	116.42	106.65

在能源结构优化情景下,CO₂ 排在 2036 年达到峰值,为 107.53 亿 t.相对于基准情景,排放峰值降低了 10.94 亿 t,且峰值时间提前了 6a.由表 3 可见,各个领域的碳排放均有所下降.2050 年电力行业的碳排放占排放总量的比重从基准方案的 34.3%降低到 30.8%,而交通、农业、生活领域的排放比重均比基准情景有所上升。

在气候变化约束情景下(表 4),CO₂ 排在 2031 年达到峰值,为 94.72 亿 t.相对于基准情景,排放峰值降低了 23.75 亿 t,且峰值时间提前了 11a.设定这一目标是应对全球气候变化的需要,实现这一目标要求未来单位产值能耗在情景 B 的基础上进一步降低,2050 年万元 GDP 能耗降低到 0.4t 标准煤以下,而且需要持续扩大核能、风能、太阳能及其他清洁能源的比重,2050 年清

表 3 情景 B 的 CO₂ 排放(×10⁸t)

Table 3 CO₂ emissions for scenario B (×10⁸t)

行业	2010	2020	2030	2040	2050
电力	25.50	34.04	37.82	33.61	27.73
水泥	10.12	10.93	9.81	9.04	6.68
钢铁	7.47	8.63	7.47	5.96	3.87
化工	4.63	6.79	6.06	4.68	3.46
交通运输	5.36	8.00	10.73	12.83	13.16
生活	7.12	11.06	13.55	14.28	13.27
农业	2.14	2.73	3.76	4.79	4.99
其他	5.51	9.91	15.45	17.46	16.93
总计	67.86	92.10	104.65	102.65	90.08

表 4 情景 C 的 CO₂ 排放(×10⁸t)

Table 4 CO₂ emissions for scenario C (×10⁸t)

行业	2010	2020	2030	2040	2050
电力	25.20	31.30	34.93	28.71	26.38
水泥	10.03	10.05	9.00	7.11	5.47
钢铁	7.36	7.97	6.76	4.71	3.17
化工	4.56	6.62	5.49	3.69	2.83
交通运输	5.30	7.36	9.87	10.13	10.36
生活	7.04	10.15	9.69	11.27	10.76
农业	2.11	2.51	3.64	3.78	4.09
其他	5.44	9.11	13.99	13.78	13.86
总计	67.05	85.07	93.36	83.19	76.92

2.2 主要行业 CO₂ 减排探讨

城市化、工业化的进程主导着中国的能源及其他资源的消费状况.以 2007 年为例,中国 GDP 占世界总量的 6%左右,而钢材消费量大约占世界钢材消耗的 30%以上,水泥消耗大约占世界水泥消耗量的 55%^[24].在全球共同应对气候变化的背景下,2009 年 11 月,中国制订了控制温室气体排放的行动目标,到 2020 年单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%~45%^[25].要达到这一目标,电力、水泥、钢铁等高耗能行业需要率先节能降耗。

2.2.1 化石能源 在目前的一次能源结构中,化石能源尤其是煤炭的比重过高,这是导致中国 CO₂ 排放量较高以及空气污染严重的重要原因.中国 2008 年的能源消费中,煤炭占 69%,石油和天然气合计占 22%,包含核电、水电、风电在内

的清洁能源占比重仅仅为 9%^[26]。

在可预见的时期内,煤炭发电仍将是我国主要的发电方式。除提高发电效率之外,对火电厂实施碳捕获和储存技术(CCS)将是短期内减少火电厂的排放量的有效途径。CCS 指从一个排放设备中把 CO₂ 捕获,然后通过管道运输,最终注入地下可安全封存数千年的地质封存库。在中国发展该技术面临着技术、经济、政策以及项目执行层面等诸多挑战,主要的是成本与能耗问题。发电厂或其他工业设施增添捕获、运输和封存 CO₂ 设备,势必会增加能耗,以及基建和运营成本。所以,中国在作出减排承诺的同时,需要与发达国家进行技术与经济合作,以清洁发展机制为参照,参与国际范围内 CO₂ 减排的市场交易,多方面推进 CO₂ 的减排。

2.2.2 水泥行业 水泥行业是典型的高耗能行业,其能源消耗在建材工业和整个工业部门中占有相当比重。据统计,2007 年中国水泥制造业能源消费总量为 1.43 亿 t 标准煤,占建材工业能源消费量的 73.4%,占整个工业部门能源消费量的 7.5%,水泥制造业万元增加值综合能耗是工业部门单位工业增加值能耗的 6 倍^[16]。

根据对城市化水平的预测(表 1),未来中国城市人口的增长无论是绝对数量还是增长速度都会逐渐下降,城市基础设施和住房的需求也呈同样的变化规律,水泥的年需求量也会先上升后下降。此外通过改进水泥的生产工艺、提高新型干法水泥比重、推广资源综合利用、淘汰落后产能、使用一定量的替代燃料等方法来实现水泥行业的碳减排等,也可以在一定程度上实现碳排放的下降。

2.2.3 钢铁 未来钢铁的需求量也与城市化进程密切相关,其变化规律与对水泥的需求类似。目前钢铁行业 CO₂ 排放量仅次于电力和水泥,在中国工业行业的 CO₂ 排放中居第 3 位。钢铁行业的节能技术进步对国民经济具有重要意义。《钢铁产业调整和振兴规划》^[27]中规定,到 2011 年重点大中型企业吨钢综合能耗不超过 620kg 标准煤,二次能源基本实现完全回收利用,冶金渣接近完全综合利用。目前我国的钢铁产能存在过剩现象,部分中小型钢铁企业,由于工艺设备落后,节能减排措施不到位,极大地影响了全行业低碳发展水

平的提升。因此,需要进一步淘汰落后生产能力、实行设备大型化、推广和应用重点节能技术等。

2.2.4 交通运输 交通运输业是能源消费持续上升领域。2009 年,我国生产汽车 1379.10 万辆,销售汽车 1364.48 万辆,产销均跃居世界第 1 位^[28]。随着城市化的快速推进和城乡居民收入的提高,未来我国的机动车保有量还会大幅增加,交通运输业的能源消费也会持续增长,在能源消费总量中的比重也会持续上升。目前我国境内的石油年产量已接近极限,国际市场的石油供应面临较大的不确定性,因此,开发新能源汽车(如燃料电池、太阳能汽车等)是保持汽车产业可持续发展的必然选择。

3 CO₂ 减排的国际对比

城市化与工业化直接影响中国 CO₂ 排放的变化,这并非中国的特例。事实上,在 UNFCCC 中,已实现 CO₂ 排放下降的国家也存在这一现象。如图 1 所示,这些国家在 20 世纪前半期的 CO₂ 排放处于平缓增长状态;二战结束后至 20 世纪 70 年代后期经历了一个快速增长的阶段(图 1 中 1945~1990 年德国数据仅包括联邦德国,1991 年之后加上原民主德国数据);20 世纪 70 年代末至 20 世纪 80 年代初期已到达 CO₂ 排放峰值,其间虽然有小幅度的波动,但基本趋势一致。UNFCCC 的温室气体减排约束机制是从 1992 年开始制定的,《京都议定书》在 1997 年商定,而上述国家则早在 UNFCCC 机制形成之前就进入了 CO₂ 排放的下降阶段,说明这些国家 CO₂ 排放的下降是经济发展的内在规律决定。德国、英国、法国等国家出现 CO₂ 排放量显著的下降趋势是从 1974 年开始的,直接原因是第一次石油危机的冲击。另一方面,荷兰、比利时、罗马尼亚、丹麦等国家在石油危机爆发后,其 CO₂ 排放量变化较为平缓,说明石油危机仅仅是促使这些国家 CO₂ 排放量下降的原因之一,深层次的原因是这些国家工业化、城市化进程基本完成,能源消费高速增长的时期已经结束。

图 2 显示了 1990 年(UNFCCC 确立的基准年)中国、印度与发达国家城市化率及第三产业比重的差异。1990 年,发达国家的城市化率均在 70%以

上,第三产业比重均在 60%以上.同一时期中国和印度的城市化率低于 30%,第三产业比重低于 40%.进入工业化后期的美国、日本、加拿大、澳大利亚等国家的 CO₂ 排放量仍在增加,处于工业化中期的中国和印度的 CO₂ 排放量也将继续增长较长的时间.如果按照发达国家的历史经验,中国的 CO₂ 排放在城市化率达到 60%以上时才会达到最高点.但由于全球气候变暖问题已经十分紧迫,中国应提前达到 CO₂ 排放量的最高点,并逐步减少排放量,这正是本研究情景 C 所设定的目标.

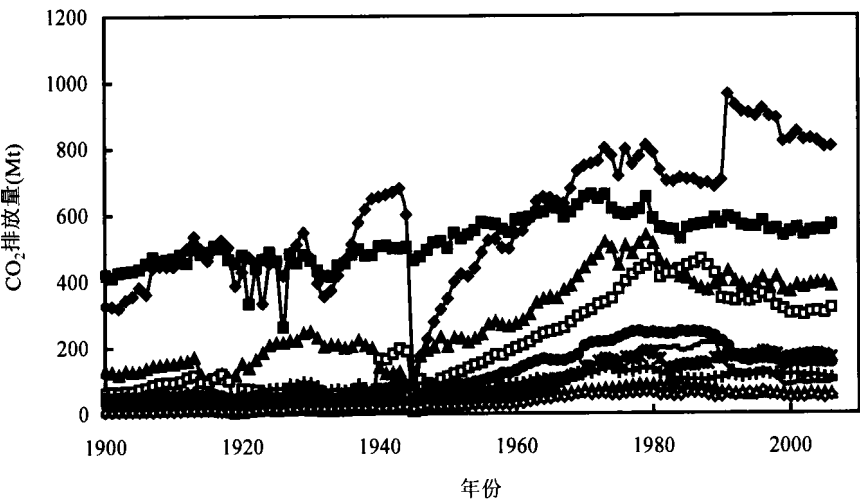


图 1 已实现 CO₂ 减排的部分国家的排放规律
Fig.1 Law of the CO₂-emissions-reduction-countries

—◆— 德国 —■— 英国 —▲— 法国 —□— 波兰 —*— 荷兰 —+— 比利时
—●— 捷克斯洛伐克 —○— 罗马尼亚 —△— 匈牙利 —◇— 丹麦

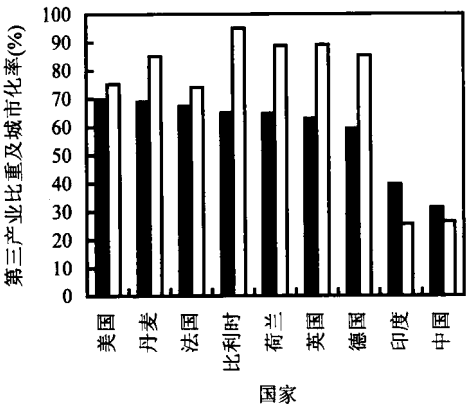


图 2 部分国家 1990 年的城市化率与第三产业比重
Fig.2 Urbanization rate and tertiary industry ratio in some countries in 1990

■ 第三产业比重 □ 城市化率

4 结论

4.1 按照目前的能源利用趋势发展,中国的 CO₂

排放峰值将出现在 2042 年,超过 110 亿 t. 通过大力改善能源结构和提高能效,峰值有可能控制在 110 亿 t 以下.

4.2 依据 IPCC 确立的全球减排目标,中国需将 CO₂ 排放峰值控制在 100 亿 t 以下,峰值时间在 2030 年左右.

4.3 在基准情景下,电力、水泥、钢铁、化工行业的碳排放比重下降,分别由 2010 年的 37.6%、14.9%、11.0%、6.8%下降到 2050 年的 33.4%、7.1%、4.1%、3.7%,而交通运输、生活用能比重分别由 2010 年的 7.9%、10.5%上升到 2050 年的 14.4%、13.9%.

参考文献:

[1] UNFCCC. Greenhouse gas inventory data[EB/OL]. http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/items/4146.php. 2007-09-10.
[2] 魏一鸣,吴 刚,刘兰翠,等.能源-经济-环境复杂系统建模与应

- 用进展 [J]. 管理学报, 2005,2(2):159-170
- [3] Toshihiko Nakata. Energy-economic models and the environment [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004,30(4):417-475.
- [4] Arvydas Galinis, Marko J Van Leeuwen. A CGE model for lithuania: The future of nuclear energy [J]. Journal of Policy Modeling, 2000,22(6):691-718.
- [5] Chae Young Lim, Byong Whilee, Kun Jailee. Nuclear energy system for the global environmental regulation in Korea energy-economy interaction model analysis [J]. Progressin Nuclear Energy, 1998,32(4):273-219.
- [6] Manne. IIASA-ECS modeling framework[EB/R]. <http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/docs/models.html#Macro>, 2004-09-04.
- [7] Eric D Larson, Wu Zongxin, Pat DeLaquil, et al. Future implications of China's energy-technology choices [J]. Energy Policy, 2003, 31(12):1189-1204.
- [8] Shin Ho Chul, Park Jin Won, Kim Ho Seok, et al. Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model [J]. Energy Policy, 2005,33(10):1261-1270.
- [9] 陈文颖,高鹏飞,何建坤.MARKAL-MACRO 模型研究碳减排对中国能源系统的影响 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(3):342-346.
- [10] Hamilton D L, Goldstein A G, Lee J, et al, MARKAL-MACRO, An overview [R]. Brookhaven: Brookhaven Publishing, 1992.
- [11] Jones D W. How urbanization affects energy use in developing countries [J]. Energy Policy, 1991,19:621-630.
- [12] Hiroyuki L M. The effect of urbanization on energy consumption [J]. the Journal of Population Problems, 1997,53(2):43-49.
- [13] 耿海青.能源基础与城市化发展的相互作用机理分析 [D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2004.
- [14] Gates David F, Ying Jason Z. Urbanization and Energy in China: issues and implications [M]. Urbanization and social welfare in China. Burlington VT: Ashgate Publishing, 2004.
- [15] Gerard Adams, Yochanan Shachmurove. Modeling and forecasting energy consumption in China: Implications for Chinese energy demand and imports in 2020 [J]. Energy Economics, 2008,30:1263-1278.
- [16] 贺成龙,吴建华,刘文莉.水泥生态足迹计算方法 [J]. 生态学报, 2009,29(7):3549-3558.
- [17] 国家发展改革委员会.节能减排综合性工作方案 [Z]. 2007-06-03.
- [18] 国家发展改革委员会.全国能源工作会议在京召开[EB/R]. http://www.sdpc.gov.cn/xwfb/t20100115_324927.htm.2010-01-15.
- [19] IPCC.气候变化 2007 年:综合报告[EB/R]. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_cn.pdf, 2007-11-17.
- [20] 张聆广,蒋正华.人口信息分析技术 [M]. 北京:中国社会科学出版社, 2006:133-134.
- [21] 杨书章,王广州.孩次性别递进人口发展模型及孩次性别递进指标体系 [J]. 中国人口科学, 2006,2:26-29.
- [22] Keyfitz N. Do cities grow by natural increase or by migration? [J]. Geographical Analysis, 1980,12(2):142-156.
- [23] 米红,周伟,史文钊.人口迁移重力模型的修正及其应用 [J]. 人口研究, 2009,33(4):99-104.
- [24] 林伯强.中国的节能减排比发达国家难得多[EB/Z]. <http://www.china5e.net/news/newpower/200803/200803060266.html>, 2008-03-06.
- [25] 新华网.中国首次宣布温室气体减排清晰量化目标[EB/R]. http://news.xinhuanet.com/politics/2009-11/26/content_12545939.htm, 2009-11-26.
- [26] 国家统计局.中国统计年鉴 2009 [M]. 北京:中国统计出版社, 2009.
- [27] 国务院.钢铁产业调整和振兴规划[EB/R]. http://www.gov.cn/zwgg/2009-03/20/content_1264318.htm,2009-03-20.
- [28] 工业与信息化部. 2009 年汽车工业经济运行报告 [R]. 2010-01-18.

作者简介: 周伟(1980-),男,山东泰安人,厦门大学博士研究生,主要从事人口资源环境的系统研究.发表论文 6 篇.