

中国经济系统中化石燃料的物质流分析

徐明, 张天柱

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 研究了中国经济系统与自然环境间相互作用, 为可持续发展提供可度量的指标, 对 1990 至 2000 年间中国经济系统所使用的化石燃料数据进行统计分析。以在欧美得到广泛应用的物质流分析方法为基础, 结合中国统计资料的特点, 重点计算化石燃料物质需求总量, 并通过与人口、经济数据的结合得到其他统计指标。研究表明, 中国经济系统对化石燃料的利用存在很多问题, 为了实现化石燃料利用的可持续发展, 2010 年和 2050 年中国对化石燃料的利用效率应该分别达到 1990 年西德和 1994 年日本的水平。

关键词: 可持续发展; 化石燃料; 物质流分析; 物质需求总量

中图分类号: X 24

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2004) 09-1166-05

Material flow analysis of fossil fuel usage in the Chinese economy

XU Ming, ZHANG Tianzhu

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

Abstract Fossil fuel utilization in China from 1990 to 2000 was analyzed to study the relationship between the national economic system and the environmental impact to provide indicators for sustainable development. The MFA (material flow analysis) method was used to calculate the TMR (total material requirement) of fossil fuel combustion based on the characteristics of Chinese fuel sources and uses. The TMR indicator was combined with population and economic data to statistically analyze usage patterns. The results show that the current usage patterns of fossil fuels in China are creating many environmental problems. For sustainable development, the fossil fuel usage efficiency of China in 2010 should reach the level of West Germany in 1990 and in 2050 should reach the level of Japan in 1994.

Key words sustainable development; fossil fuel; material flow analysis; total material requirement

重要内容. 20 世纪 90 年代初, 德国 Wuppertal 研究所的 Ernst von Weizsaecker 提出了生态包袱 (ecological rucksacks) 的概念^[1], 后来也称其为隐流 (hidden flows), 即在开采一次资源过程中所不可避免产生的废弃物, 它们一经产生就被废弃, 不进入社会经济系统, 不产生经济效益, 但是对自然环境有很大影响。在此基础上, 逐渐形成了物质流分析这一重要工具, 系统地用于资源环境与经济相互作用的研究^[2]。但应用物质流分析方法对中国经济系统进行的研究分析仍十分少见^[3,4]。

本文以“八五”、“九五”期间中国国民经济系统运行所用的化石燃料为对象, 运用物质流方法进行分析, 以此考察中国化石燃料的利用状况, 并为今后对化石燃料的利用由资源消耗型 (materialized) 向非物质化型 (dematerialized) 转移提出建议。

1 分析方法以及数据来源

当前, 国际上已初步建立起一套比较系统的基于国家或地区经济系统的物质流分析框架 MFA (material flow analysis)^[5,6], 并在欧美发达国家得到了多种方式的应用, 本文依据该框架和概念进行化石燃料的物质流分析, 测算对象包括煤炭、石油和天然气。

研究所用原始数据均来自公开出版的各类统计年鉴, 时间跨度从 1990 年至 2000 年, 这是中国近期国民经济和社会发展的重要时期。对于各类统计年鉴中给出的以体积度量的天然气数据, 根据相关文献^[7]近似按天然气密度 0.75 kg/m^3 进行质量折算。鉴于中国在隐流数据及相应研究上的空白, 本文在隐流测算中采用生态包袱平均比率进行估算。生态

收稿日期: 2003-10-24

基金项目: 中国工程院城市循环经济研究项目

作者简介: 徐明 (1981-), 男 (汉), 甘肃, 硕士研究生。

通讯联系人: 张天柱, 教授, E-mail: zhangt@tsinghua.edu.cn

人类社会经济系统与自然环境之间是依靠各种物质流 (material flow) 联系起来的, 对这些物质流进行分析和研究是衡量非物质化以及可持续发展的

包袱平均比率定义为在平均生产力水平下,开采一定的资源与所产生的隐流的质量比。德国 Wuppertal 研究所对全球生态包袱平均比率进行了估计,其中原油为 1: 1.22, 天然气为 1: 1.66^[8]。此外,考虑到中国煤炭资源以硬煤为主^[9],因此在计算煤炭隐流时取硬煤的生态包袱平均比率为 1: 2.36。

利用国外相关研究成果中的数据进行分析提取,得到日本、匈牙利、德国三国化石燃料的需求量数据^[10-12],再进行国际对比分析。

考虑到经济数据含有通货膨胀或通货紧缩因素的影响,而物质流量不随时间而变化,因此综合两者的比较时,需要将经济流数据换算成以某一既定时间价格为标准的基价(constant price)。本文根据国际货币基金组织 IMF(International Monetary Fund)提供的最新数据,将中国以及日本、匈牙利、德国历年 GDP 值换算成以美元为单位,按 2000 年的价格计算基价^[13]。

2 化石燃料物质流测算结果

通过对原始统计数据的计算处理,得到中国经济系统对化石能源物质的需求量,即自然环境直接输入到中国经济系统的物质流(表 1)。

表 1 中国经济系统对能源物质的需求量

年份	石油需求量/万 t		煤炭需求量/万 t		天然气需求量/万 t	
	开采	进口	开采	进口	开采	进口
1990	13 831.00	607.92	107 988.30	200.31	1 070.86	0.00
1991	14 099.00	1 057.64	108 740.60	136.81	1 125.11	0.00
1992	14 210.00	1 905.92	111 638.00	123.14	1 105.16	0.00
1993	14 524.00	3 364.67	115 067.00	142.92	1 173.55	0.00
1994	14 608.00	1 620.29	123 990.10	121.16	1 229.13	0.01
1995	15 004.95	5 072.45	136 073.10	163.63	1 256.29	0.06
1996	15 733.39	4 199.72	139 669.90	321.80	1 407.98	0.00
1997	16 074.14	6 283.81	137 282.00	201.42	1 589.21	0.00
1998	16 100.00	5 384.59	125 000.00	158.67	1 629.53	0.00
1999	16 000.00	6 065.68	104 500.00	167.28	1 763.86	0.00
2000	16 300.00	9 313.75	99 800.00	217.90	1 904.00	0.00

将直接输入经济系统的化石燃料流与其相应的隐流进行加和,可得到能够全面衡量经济系统影响资源环境的物质需求总量 TMR(total material requirement)。将人口资料与 TMR 结合,可获得人均消耗自然资源的统计指标资源消耗强度(resource consumption intensity)。综合经济指标 GDP 与 TMR,可进一步分析资源利用效率,将每单位质量的物质需求总量所产生的 GDP 定义为资源生产力(resource productivity)。1990 至 2000 年的化石燃料物质需求总量、资源消耗强度以及资源生产力计算结果如表 2 所示。

表 2 中国能源物质流分析统计指标

年份	TMR	人口	资源消耗强度	GDP	资源生产力
	万 t				
1990	398 416.62	114 333	3.48	5 104.90	128.13
1991	402 468.63	115 823	3.47	5 574.55	138.51
1992	414 234.50	117 171	3.54	6 366.14	153.68
1993	429 939.82	118 517	3.63	7 225.57	168.06
1994	456 310.15	119 850	3.81	8 135.99	178.30
1995	505 669.14	121 121	4.17	8 990.27	177.79
1996	518 368.85	122 389	4.24	9 853.33	190.08
1997	515 806.24	123 626	4.17	10 720.43	207.84
1998	472 563.47	124 761	3.79	11 556.62	244.55
1999	405 359.74	125 786	3.22	12 377.14	305.34
2000	397 987.31	126 743	3.14	13 367.31	335.87

综合考虑输入中国经济系统的化石燃料流,以及经过生产消费等环节之后输出到自然环境中的废弃排放物,可以对给定时间内中国经济系统中化石燃料流的输入与输出关系进行分析考察。以 1999 年为例,化石燃料物质流平衡如图 1 所示。

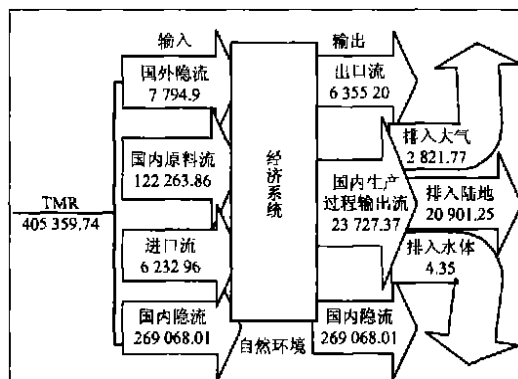


图 1 1999 年化石燃料物质流平衡图(单位: 万 t)

3 讨论

根据上述统计测算结果,可以从不同方面来考察经济系统与自然环境间的相互作用。以下重点对物质需求总量变化趋势、化石燃料资源消耗强度、化石燃料资源生产力等三个方面来进行分析。

3.1 物质需求总量变化

由化石燃料物质需求总量测算结果,可以明显看出中国经济系统对化石燃料需求的变化经历了两个阶段:“八五”期间,化石燃料 TMR 持续增加,由 1990 年的 398 416.62 万 t 增长到 1995 年的 505 669.14 万 t,增幅达 26.9%,年均增长 4.9%,这种高速增长在 1996 年达到顶点;进入“九五”后,化石燃料 TMR 开始逐年下降,年均降幅达 6.4%,由 1996 年的 518 368.85 万 t 降低到 2000 年的 397 987.31 万 t,基本回复到“八五”初期水平。“八五”和“九五”期间化石燃料 TMR 的不同变化反映了中国经济增长方式与能源利用效率的变

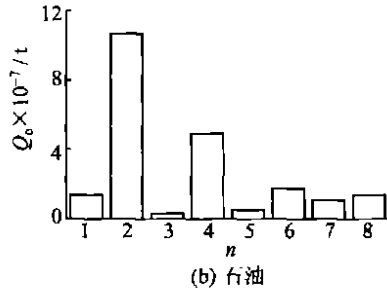
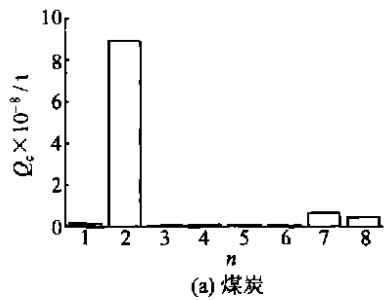
化。事实上,“八五”期间,由于当时主要考虑增长速度问题,对转变以环境资源为代价的粗放型发展经济的方式并未引起足够重视。到了“九五”时,转变经济增长方式与转变经济体制作为必须实施的两大转变,成为中央经济建设和“九五”计划纲要的基本要求,中国在转变经济增长方式上开始迈出了较大的步伐。国民经济在保持较高增长速率的同时,所消耗的自然资源量正在下降。

化石燃料 TMR 的组成结构表明,虽然中国煤炭资源的需求量仍占据主要地位,但石油和天然气相对比重有所上升。从“八五”初期开始,煤炭在中国国民经济所需化石燃料组成中的比重始终在增加,从 1990 年的 87.9% 增长到 1996 年的 89.1%。这期间石油 TMR 尽管数量上也在不断增长,但在化石燃料需求中的比重却是下降的,由 1990 年的 11.3% 降低到 1996 年的 10.0%。进入“九五”后,主要由于煤炭需求量下降而导致了化石燃料 TMR 的下降,但石油需求量开始上升,到了 2000 年,虽然中国能源结构仍以煤炭为主,但是其比重已经降低到 84.6%,而石油所占比重则上升到 13.8%。当然,从世界范围来看,与发达国家的石油需求量在其能源结构中所占比重均在 35% 以上相比,如果再将水电、风电、核能等其他能源类型统计在内,则中国石油需求量所占比重还是相当低的。

由消耗化石燃料的行业部门分析,工业部门是化石燃料的主要需求者。以 1999 年为例,工业部门的需求量占煤炭需求总量的 85.2%,可见中国经济系统对煤炭的巨大需求量基本上是由工业部门所贡献的。同样以 1999 年为例,工业部门的需求量占石油需求总量的 48.3%,其次为交通运输仓储及邮电通讯业,占 22.3%,由图 2a-b 所示,其中 Q_c 为煤炭需求量, Q_o 为石油需求量, n 为行业部门。

3.2 资源消耗强度

类似于化石燃料 TMR 的变化,资源消耗强度也经历了“八五”期间的增长和“九五”期间的下降两个阶段。在“八五”期间,化石燃料资源消耗强度的增长速率比同时期人口增长速率大的多,前者年均增幅最高达到 3.7%,后者仅有 1.0%。进入“九五”之后,中国人口增长率基本保持在与“八五”时期相同的水平,年均增长 0.9%。然而化石燃料资源消耗强度却有了较大程度的下降,由 1996 年的 4.24t/人降低到 2000 年的 3.14t/人,年均降幅 5.9%。尤其是 1997 到 1999 两年间,资源消耗强度由 4.17t/人降低到 3.22t/人,年均降幅达到 10.8%。



- 1—农林牧副渔水利业; 2—工业; 3—建筑业;
- 4—交通运输仓储及邮电通讯业;
- 5—批发和零售贸易餐饮业;
- 6—其他行业; 7—生活消费; 8—出口

图 2 1999 年中国各行业化石燃料需求量对比

对比日本、匈牙利、德国三国的化石燃料资源消耗强度(图 3),虽然从人均消费上对比中国处于相对较低的水平,但在绝对数量上中国化石燃料的需求量大大超过这些国家,以 1994 年为例,日本的化石燃料 TMR 为 156900.0 万 t,匈牙利为 17496.7 万 t,德国为 274563.24 万 t,而中国为 456310.15 万 t。由于人口众多而产生的资源消耗量巨大的问题将是中国经济发展中一个极大的瓶颈限制。

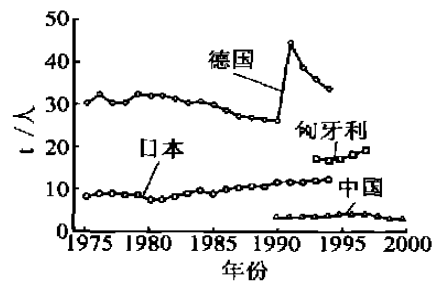


图 3 各国化石燃料资源消耗强度对比

注:德国数据在 1990 年之后的突变是由于东德、西德统一所致,此前的数据只包括西德。

3.3 资源生产力

作为自然资源与经济指标的综合,以单位自然资源所产生的 GDP 所表征的资源生产力,将是一个度量资源环境与社会经济相互关联作用的有效指

标。与化石燃料 TMR 和资源消耗强度先升后降的变化规律不同,化石燃料资源生产力从“八五”初至“九五”末一直呈上升趋势,每吨化石燃料 TMR 所产生的 GDP 从 1990 年的 128.13 美元提高到 2000 年的 335.87 美元,增幅达到 162%, 年均增长 10.1%。所不同的是“九五”期间的上升速率要比“八五”期间更大。具体来看,“八五”期间中国化石燃料资源生产力增长趋势较为平缓,每吨 TMR 所产生的 GDP 由 1991 年的 138.51 美元到 1995 年的 177.79 美元,增幅为 128%, 年均增长率为 6.4%。进入“九五”之后,资源生产力有了较大提高,从 1996 年每吨 TMR 产生 190.08 美元 GDP 到 2000 年的 335.87 美元 GDP, 增幅达 177%, 年均增长率为 15.3%。

对比日本、匈牙利和德国的化石燃料资源生产力(图 4), 可以看出,虽然中国化石燃料的资源生产力正在不断上升,即对化石燃料的利用效率有了很大提高,但是相对日本和德国这样的发达国家而言,中国的资源生产力还处在很低的水平,甚至低于匈牙利这一东欧国家。以 1994 年为例,日本、匈牙利和德国的化石燃料资源生产力分别为 3745.17、284 和 994.66 美元/t, 而同年中国化石燃料的资源生产力为 178.30 美元/t, 仅为日本的 4.8%, 匈牙利的 62.8%, 德国的 17.9%。这一方面说明目前中国国民经济对化石燃料的利用效率很低,有待于进一步提高,另一方面也说明了中国经济发展存在极大的增长机会,即资源利用效率具有很大的提升空间。

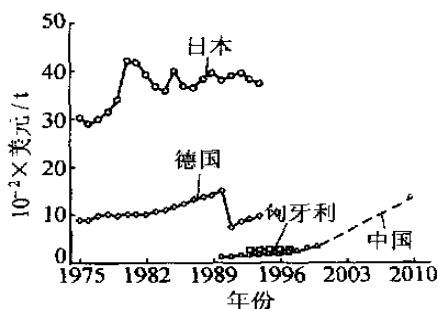


图 4 各国化石燃料资源生产力对比

注: 德国数据在 1990 年之后的突变是由于东德、西德统一所致,此前的数据只包括西德。

为了实现可持续发展,将经济增长方式由资源消耗型转向非物质化型,欧美学者近年来提出 Factor 4 和 Factor 10 理念,即在 10 年内将资源生产力提高到 4 倍,在 50 年内提高到 10 倍。按照这一目标,到 2010 年,中国化石燃料的资源生产力至少要提高到每吨 TMR 产生 1300 美元 GDP(2000 年

价格)的水平(图 4),才能满足 Factor 4 的要求,这大致相当于统一前西德的生产力水平。按照 GDP 年均增长率为 6% 估算,2010 年的 TMR 需要降低到 184144 万 t,与 2000 年相比,降幅需要达到 54%, 年均降幅为 7.4%, 这比“九五”期间年均降幅 6.4% 的要求还要高。如果今后 GDP 年均增长率不足 6%, 则降幅还要更大。同样,为了满足 Factor 10 的要求,到 2050 年,中国化石燃料的资源生产力至少要达到 3300 美元/t, 这大致相当于目前日本的生产力水平。同样按照 GDP 年均增长率为 6% 计算,2050 年的化石燃料 TMR 应为 74615 万 t, 与 2000 年相比降幅需达 81%, 年均降幅为 3.3%。考虑到生产力水平和资源利用效率的提升空间有限,因此在 50 年内达到年均 3.3% 的化石燃料 TMR 削减率并不比 10 年内达到年均 6.4% 的削减率容易。

4 结论

1) 中国化石燃料需求总量在“八五”、“九五”期间经历了先升后降的变化。“八五”期间经济发展迅速,对化石燃料,尤其是煤炭的需求量不断增加,进入“九五”后,在保持经济高速发展的同时,物质需求总量开始逐年下降,到“九五”末已经基本回落到“八五”初期水平。这表征着中国在实施可持续发展战略、转变经济增长方式中的进展。

2) 虽然中国人口众多,资源消耗强度处于较低的水平,但支持中国国民经济发展的化石燃料总量却远高于发达国家,这是严重制约中国经济发展的瓶颈。

3) 中国化石燃料的资源生产力正在不断提升,但与其他国家相比还存在相当大的差距,必须下大力气改进能源物质的资源生产力。按照 Factor 4 和 Factor 10 的设想,2010 年和 2050 年中国化石燃料生产力分别需达到 1990 年西德和 1994 年日本的水平。

大力提高资源、能源利用效率和资源生产力,是实现可持续发展,促进经济增长方式由资源消耗型向非物质化转变的根本。依靠观念创新、制度创新和科技创新,推广清洁生产,推进循环经济,是使中国社会经济与资源环境协调的保证。

参考文献 (References)

- [1] Schmidt-Bleek F. The Factor 10/MIPS-Concept Bridging Ecological, Economic, and Social Dimensions with Sustainability Indicators [R]. ZEF-EN-1999-3-D, Tokyo: United Nations University, 1999.

- [2] 陈跃, 邓南圣. 面向二十一世纪的环境管理工具——物质与能量流动分析 [J]. 重庆环境科学, 2003, 25(3): 1-5.
CHEN Yue, DENG Nansheng. Environmental management approach geared to the 21st century—Matter and energy flow analysis [J]. *Chongqing Environmental Sciences*, 2003, 25(3): 1-5. (in Chinese)
- [3] 陈效速, 乔立佳. 中国经济——环境系统的物质流分析 [J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 17-23.
CHEN Xiaohui, QIAO Lijia. The material flow analysis of economy-environment system in China [J]. *Natural Resources*, 2000, 15(1): 17-23. (in Chinese)
- [4] CHEN Xiaohui, QIAO Lijia. A preliminary material input analysis of China [J]. *Population and Environment*, 2001, 23(1): 117-126.
- [5] Bartelmus P, Vesper A. Green Accounting and Material Flow Analysis—Alternatives or Complement? [EB/OL]. <http://www.wuppertal-institut.de/Publikationen/wp/wp106.pdf>, 2000.
- [6] Bartelmus P. Dematerialization and Capital Maintenance Two Sides of the Sustainability Coin [EB/OL]. <http://www.wuppertal-institut.de/Publikationen/wp/wp120.pdf>, 2002.
- [7] 魏宗濂, 黄木桂. 试析 CNG 加气站的天然气进销差率 [EB/OL]. <http://www.ccgas.net/zl/lw3/fzqj16.htm>, 2000.
- WEI Zonglian, HUANG Mugui. The Analysis on the Difference Ratio of the Natural Gas in CNG Gas Station [EB/OL]. <http://www.ccgas.net/zl/lw3/fzqj16.htm>, 2000. (in Chinese)
- [8] 陈效速. 自然地理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.
CHEN Xiaohui. *Physical Geography* [M]. Beijing: Peking University Press, 2001. (in Chinese)
- [9] 陈武, 唐辛, 张希诚. 中国煤炭资源及其开发利用研究 [J]. 煤炭经济研究, 2003, (7): 6-11.
CHEN Wu, TANG Xin, ZHANG Xicheng. The study of coal resources and exploitation in China [J]. *Coal Economic Research*, 2003, (7): 6-11. (in Chinese)
- [10] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, et al. Resource Flows The Material Basis of Industrial Economies [M]. Washington DC: World Resources Institute, 1997.
- [11] Matthews E, Amann C, Bringezu S, et al. Weight of Nations Material Outflows from Industrial Economies [M]. Washington DC: World Resources Institute, 2000.
- [12] Hammer M, Hubacek K. Material Flows and Economic Development Material Flow Analysis of the Hungarian Economy [R]. IR-02-057, Luxembourg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2003.
- [13] International Monetary Fund. World Economic Outlook Database April 2003 [EB/OL]. <http://www.imf.org/external/np/eng/dll/search97cgi/inetsrcheng.in?action=FilterSearch&filter=spquery.ht&QueryText=weo%20repts>, 2003.

(上接第 1165 页)

参考文献 (References)

- [1] 钱国强, 林雪, 何炳林. 硼酸与多羟基化合物的反应及硼选择性树脂 [J]. 离子交换与吸附, 1994, 10: 375-382.
QIAN Guoqiang, LIN Xue, HE Binglin. Reaction between boric acid and polyhydroxy compounds and developments of boron-selective resins [J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 1994, 10: 375-382. (in Chinese)
- [2] Barker S A, Baggett N, Stevenson J, et al. Binder Composition for Particulate Materials [P]. UK, EP Application 0 323 096 A2, 1988.
- [3] 谭晓明, 尚永华, 李焰, 等. 硼酸根与甲阶酚醛树脂中酚羟基和邻位羟甲基的螯合反应 [J]. 离子交换与吸附, 2002, 18: 69-75.
TAN Xiaoming, SHANG Yonghua, LI Yan, et al. Chelate reaction between borate ions and phenol hydroxyl group, ortho-position hydroxymethyl group of phenol-formaldehyde resol resin [J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2002, 18: 69-75. (in Chinese)
- [4] 胡飞, 唐黎明, 方宇, 等. 硼酸盐固化酚醛树脂研究 [J]. 应用化学, 2004, 21: 78-80.
HU Fei, TANG Liming, FANG Yu, et al. Study on alkaline phenol-aldehyde resins chelated by borate [J]. *Chinese J Applied Chemistry*, 2004, 21: 78-80. (in Chinese)
- [5] Andre K, Walter S. Chemistry and Application of Phenolic Resins [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
- [6] 沈德言. 红外光谱在分子研究中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
SHEN Deyan. Application of Infrared Spectroscopy in Polymer Research [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)