

能源消费的环境影响

张坤民、鲁明中、朱达

过去，人们普遍关注的是能源与经济增长的关系，但近年来人们越来越关注能源对社会与环境的影响。对于不同的一次能源、不同的能源消费过程、不同的技术背景，污染来源、污染特征及污染贡献是不同的。在一次能源中，化石燃料，特别是煤消费过程的环境影响是最严重的，然而，化石燃料消费占中国能源消费总量的 95%，其中，煤占 75%。中国不“清洁”的能源结构和日益增大的能源消费给本来就很脆弱的中国生态环境带来巨大的压力。^[1]

1 能源消费的污染来源

任何能源在其生产、运输、转换、消费过程中，或者其中的一个或几个阶段都会产生环境影响，需要付出代价，这在经济学中称为“环境费用”。本节简要说明这些环境影响是如何发生的。

[1]：本研究得到日本和平中岛财团的资助，在此表示感谢。

1.1 煤消费的污染来源

煤来自采矿。地下深井采煤所造成的最大环境问题是采煤工人的疾病，美国在 70 年代，每年约有 4000 矿工患黑肺病，英国 50 年代病的发病率是千分之八 (Wilson, 1974)。露天采矿造成的环境影响更大。1967 年，马里兰 (Maryland) 地区进行简单的露天采矿，煤矿土地重整每公顷费用达 1075 美元，1970 年增加到 1248 美元 (Bradshaw, 1978)。

矿坑或运输中转站附近的煤堆在雨水中会渗出可溶性成分，污染附近的河流、湖泊、海洋和地下水。其中的硫、铁成分可以使水与土壤变酸，影响作物生长，高浓度的金属离子可能进入鱼类等生物体，并进而进入食物链。

采矿的环境影响是地方性的，而运输与燃烧的影响是区域性的或更大范围的。与煤的运输有关的影响范围通常超过几百公里，并且在大多数地区并不十分显著，也不易被察觉。在居民区，由于采矿和运输产生严重的粉尘污染，引起呼吸道疾病。在煤运输时 柴油机、蒸汽机、卡车等排放的 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 、 CO 和碳水化合物也会引起种种问题。

用煤发电或直接应用都是一个燃烧的过程。煤的燃烧对环境和健康的影响主要来源于燃烧过程所产生的大量气体和固体废物。气体污染物包括： SO_2 、 NO_x 、 CO_2 、 CO 、碳水化合物、多碳有机物等，其它污染物还有粉尘、放射性、痕量金属等。这些污染物会导致呼吸道疾病、中毒和癌症发病率的增加。就每单位效的能源来说，煤是化石燃料中对环境危害最大的，特别是当它在非现代化操作的工厂中燃烧的时候。天然气燃烧的主要排放物是 NO_x 和粉尘，危害明显小于燃煤和燃油。美国在 70 年代每 1000MW 能力的燃煤电站日使用煤 10,000t，每年扩

散到大气中的二氧化碳约 800 万 t，二氧化硫 5 万 t，氧化氮 2 万 t，小颗粒物 25,000~250,000t (M.G.韦布，1987)。

使用高烟囱进行废气扩散，将产生较大范围的甚至越境的环境污染。中国东南部的酸雨有一些是从中部地区燃烧中的二氧化硫飘散过去的。经合组织 (OECD) 曾经谴责过英国的酸沉降对北欧的污染。

1.2 石油消费的污染来源

开采石油造成的主要环境影响是突发的爆裂渗漏、运输漏、油罐起火与爆炸。1969 年，美国三塔·巴尔巴拉(Santa Barbara)地区石油公司的油井泄露的最初 100 天，有 73000 多桶石油渗入本地区的生态系统，估计造成损失 1640 万美元 (Glavey, 1975)。不破敬一郎先生主编的《地球环境手册》中列出了近 20 年来 10 项重大公害事件(见表 1)，其中 4 项与石油消费有关，2 项与核电消费有关 (不破敬一郎，1995)，可见能源消费给环境带来的压力是巨大的。

原油在燃烧之前一般先被提炼成多种石油产品，转换过程中会排放大量的有机化学品和其他污染物，一般要制定并严格执行控制这些污染物排放的环境标准 (ADB, 1996B)。这些石油产品应用时也会有污染物产生，比如，作为汽车主要燃料的汽油在燃烧时会产生 CO_2 、 CO 、 NO_x 、碳水化合物等污染气体，后两种气体进一步反应会产生光化学烟雾。

表 1 近 20 年来与能源消费有关的重大公害事件

事件	时间	地点	危害	原因
阿摩柯卡的斯油轮泄油	1978. 3	法国西北部布列塔尼半岛	藻类、湖间带动物、海鸟灭绝、工农业生产、旅游业损失大	油轮触礁, 22 万t原油入海
三哩岛核电站泄漏	1979. 3. 28	美国宾夕法尼亚州	周围50英里200百万人口极度不安, 直接损失10多亿美元	核电站反应堆严重失水
墨西哥气体爆炸	1984. 11. 9	墨西哥	4200人伤, 400人亡, 300栋房毁, 10万人被疏散	石油公司一个油库爆炸
切尔诺贝利核电站泄漏	1986. 4. 26	前苏联、乌克兰	31人亡, 203人伤, 13万人疏散, 直接损失30亿美元	4号反应堆机房爆炸
莫农格希拉河污染	1988. 11. 1	美国	沿岸100万居民生活受严重影响	石油公司油罐爆炸, 350万加仑原油入河
埃克森·瓦尔迪兹油轮漏油	1989. 3. 24	美国阿拉斯加	海域严重污染	漏油26. 2万桶

资料来源：地球环境手册。[日]不破敬一郎主编，北京；中国环境科学出版社，1995。

1.3 核电消费的污染来源

核燃料的开采、运输，核电的生产，核废物的储存与处置等过程，都会有中底水平放射性产生。根据英国健康与安全标准执行署发表的数据表明，每 **GWh** 年的从事核电生产的职业死

亡率仅为 0.01~0.15 人。英国皇家环境保护委员会所作的研究证明，人体由于核电受到的辐射极小，远低于人体正常情况下受到的辐射量（见表 2）。从表 2 列出的数据可以看出，人体骨髓受到的辐射源于核电的只占总辐射量的 1.6%，远远低于来源于医疗 X 射线的辐射剂量（约占 21%）。可见，核电造成的辐射对人体健康的影响是极小的。

核电站没有二氧化碳的排放，没有二氧化硫与烟尘的扩散，占地较小。按常规操作，即使采铀等过程会有放射性污染，但核电比任何化石燃料对环境的影响都低得多。然而，由于切尔诺贝利核电站事故等的发生，公众对核电有一种恐惧心理，国家也对核能在政治和经济上的影响有所顾虑，再加上核电站的一次投资较大，由此阻碍了核电的大力发展。

表 2 英国 1976 年电离辐射剂量（单位：mrem/a）

辐射来源	骨髓	生殖细胞：有遗传影响的剂量
宇宙射线	33	33
土地和空气	44	44
人体	24	28
医药：x 射线诊断	32	14
医药：放射治疗	12	5
医药：使用放射性同位素	2	0.2
原子弹试验后果	6	4
(非核电) 职业剂量	0.4	0.3
核电工业	0.25	0.2
其他	0.3	0.3
总计	154	129

资料来源：英国皇家环境保护委员会报告（1976），核能环境。

1.4 水电消费的污染源

一般认为 在能源工程中 水电工程是环境损害最小的(M.G. 韦布, 1987)。水电不排放大量的污染气体或放射性废物, 但产生了其它方面的环境影响。水坝的建设将形成新的水库, 在水库及其下游, 改变了原有的生态系统。除发电、灌溉外, 水库可以发展养鱼业、旅游业等, 带来正的外部影响; 但是, 水库大坝同时会造成河流淤积和下游的水土流失, 提高库区地下水位, 引起土壤盐渍化, 影响当地的气候, 使生物多样性减少, 水流速减慢会造成水草生长和寄生虫的繁殖, 等等。

2 不同能源在整个生命周期中的污染贡献

燃料生命周期分析(life cycle analysis, LCA)是对一种能源技术或能源产品的生命过程进行分析, 或是对该系统“从摇篮到坟墓”的描述, 包括原料的开采、加工、运输、转换、利用、废物处理等过程。分析对象主要是燃料生命周期内的每一个环节产生的各种污染物对环境、生态和人体健康的影响。生命周期分析方法是一种过程导向, 包括对各自技术特点的清楚认识和对完整能源链的全面覆盖。它不光考虑工厂的直接排放物, 也包括非直接排放物, 资源的开采、运输以及废物处理方法等, 都与能源链紧密相关, 这样, 它就尽可能全面地考虑到了对环境的影响。利用生命周期方法可以比较清楚地看到能源的环境影响。但是, 生命周期分析也有许多问题, 比如, 对于同一类产品来说, 不同的研究所考察的生命过程、技术基础有所不同。

由于这些研究的载体不同, 采取的分析程序和数据也不尽相同。本节将利用一些学者所作的燃料生命周期分析的主要结论, 分

析不同燃料链和燃料链的不同环节的污染贡献。

2.1 不同能源链的污染贡献

唐斯等(R. Dones, 1996)用燃料生命周期分析方法,对瑞士电力供应系统中的不同燃料链的污染物排放进行了比较。其研究结果见表3。

目前,瑞士国内的电力供应主要依靠水力发电(大约61%和核电约37%),化石燃料的贡献很小,仅占2%。在唐斯的研究中,化石燃料发电厂按工艺分为天然气联合循环发电厂(gas combined cycle, CC,这种发电厂同样可以用石油作燃料替代天然气)燃烧高质量粉煤的发电厂(pulverized coal combustion plant, PC),有压循环硫化床燃烧发电厂(pressurized fluidized bed combustion plant, PFBC)。

利用表3中所示的生命周期分析结果,对于各个燃料链生产过程中的污染物排放,可以分别比较分析各个能源链对CO₂、二氧化硫、粉尘和辐射等4种污染物的污染贡献,得到图1、2、3、4、5。

表3 电力生产过程的污染物排放

污染物	供电系统	PC	PFBC	CC Oil	CC Gas	GT 30MW	CHP P	核电	水电	PV 3kWp m-Si	PV 3kWp a-Si
SO ₂ kg/GWh	电厂直排	216	34	421	3	4	5	0	0	0	0
	链排放	611	425	888	153	209	281	31	7	157	114
NO _x kg/GWh	电厂直排	360	68	209	119	414	186	0	0	0	0
	链排放	780	482	648	278	626	445	23	13	69	45

污染物	供电系统	PC	PFB C	CC Oil	CC Gas	GT 30M W	CHP P	核电	水电	PV 3kWp m-Si	PV 3kWp a-Si
CO ₂ t/GWh	电厂直排	664	679	445	331	456	532	0	0	0	0
	链排放	762	771	551	392	540	679	6	4	44	39
CH ₄ kg/ GWh	电厂直排	7	7	6	18	32	216	0	0	0	0
	链排放	1612	1608	645	921	1275	3460	12	7	78	96
NWV OC kg/ GWh	电厂直排	14.3	13.6	6.6	10.2	28	19.5	0	0	0	0
	链排放	148.6	143.4	1347	105	158	335.3	10.3	3.4	53.9	47.7
粉尘 kg/ GWh	电厂直排	36	34	1	1	1	0	0	0	0	0
	链排放	1719	2103	221	88	119	207	46	229	164	219
辐射 GBq/ GWh	电厂直排	0.004	0.004	0	0	0	0	0.28	0	0	0
	链排放	14.6	14.6	7.6	1.3	1.8	3.3	1014	0.8	22.5	11.1

资料来源：R. Dones等(1996)。

图 1 列出了各个能源链对 CO₂ 排放的贡献。可以看出，燃烧化石燃料的发电厂是 CO₂ 的主要的来源，而且主要是电厂的直接排放。核电、水电及光电系统没有火电厂直接排放的 CO₂，但在能源链中也有极少的 CO₂ 排放。其中，在燃烧化石燃料的发电厂中，有压循环硫化床燃烧发电厂的 CO₂ 排放最多。一般来讲，电厂都没有去除 CO₂ 的特别装置，CO₂ 排放量基本上与燃料燃烧的理论排放量相当。图 1 所示的结果同中国类似能源链的排放量变化趋势相比，区别不大，具体排放量要视所用燃料情况而定。不同燃料 CO₂ 排放量变化基本趋势是：

- 燃煤电厂 CO₂ 排放量 > 燃油电厂 CO₂ 排放量
- > 燃天然气电厂 CO₂ 排放量
- > 非化石燃料电厂 CO₂ 排放量

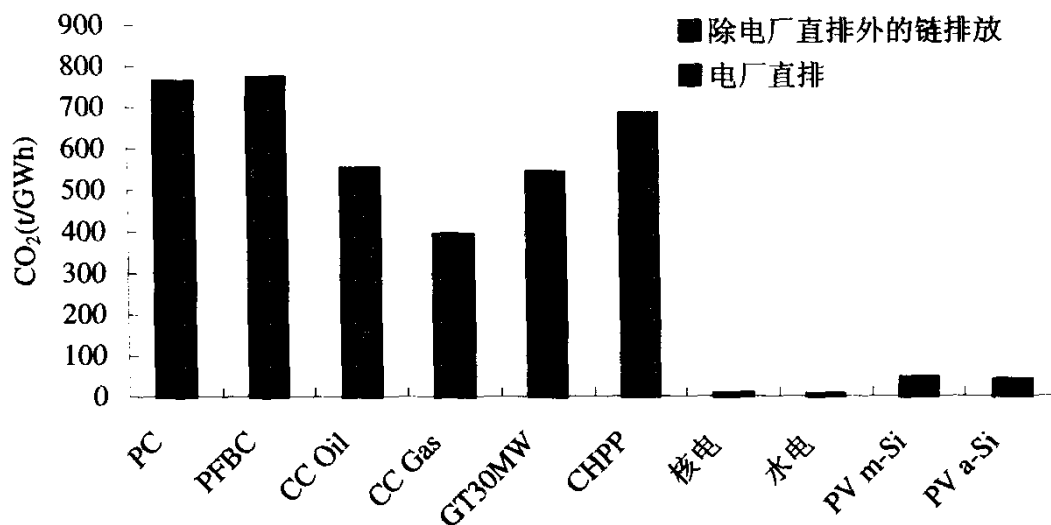


图 1 各能源链对 CO₂ 排放的贡献

从图 2 列出的能源链对 SO₂ 排放的贡献可见：SO₂ 排放主要来源于化石燃料的应用，非化石燃料的电厂二氧化硫直接排放量为 0。由于电厂脱硫设备和高技术的应用，电厂直接排放的 SO₂ 量相对较少，除了电厂之外的能源链排放较大，大于电厂的直接排放量。特别是 PFBC 工艺，电厂脱硫技术和效率都非常高，电厂直排二氧化硫量很低。由于应用高质量低硫煤、高技术、除硫设备，使得燃煤二氧化硫排放低于燃油电厂成为可能。

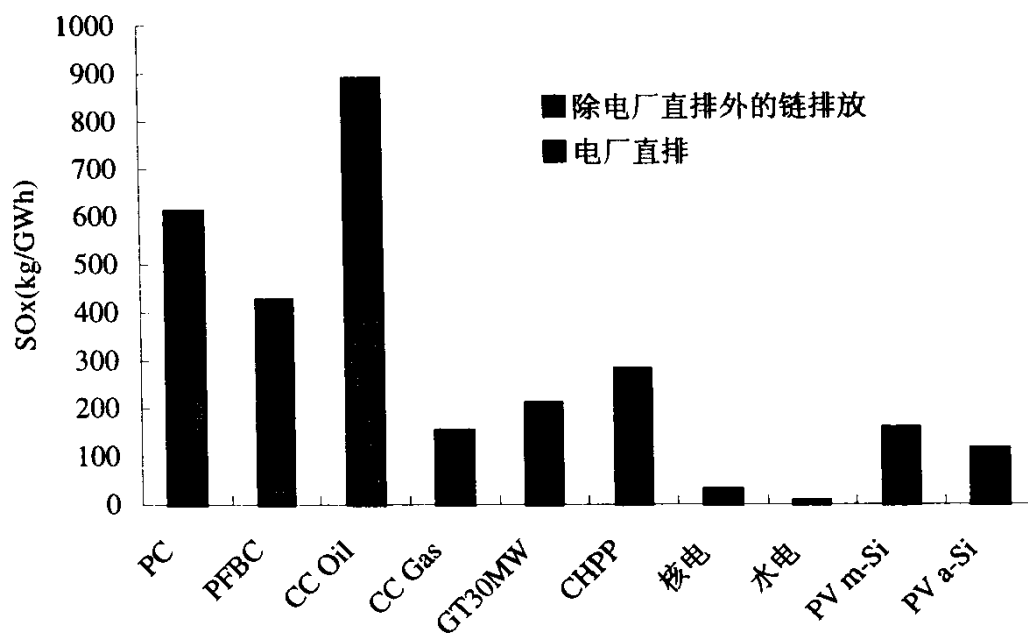


图 2 各能源链对 SO₂ 排放的贡献

由图 3 所示的能源链对粉尘排放的贡献可知，燃煤能源链粉尘排放最多，是其他能源链的 10 倍以上。粉尘基本上源于除了电厂直排之外的能源链排放，说明瑞士电厂除尘技术和效率非常高。煤的开采、运输等过程中的粉尘排放是粉尘的主要来源。相对于煤来讲，石油、天然气以及其它能源的粉尘排放是微不足道的。

图 4、5 表示出各种能源链对辐射污染的贡献。图 4 列出了污染贡献的绝对值比较，图 5 列出了污染贡献的对数值。由此比较可以看出核电厂的辐射排放远大于其它能源链。核电系统是放射性污染的主要来源，其污染量同其他能源链相比大约相差 2 个数量级以上。而这种污染主要在铀矿开采、加工、运输及后处理等程序中产生，核电站产生量极小。此外，煤、石油、天然气和光能的能源链上也都有一定的放射性。水电能源链几

乎没有放射性。

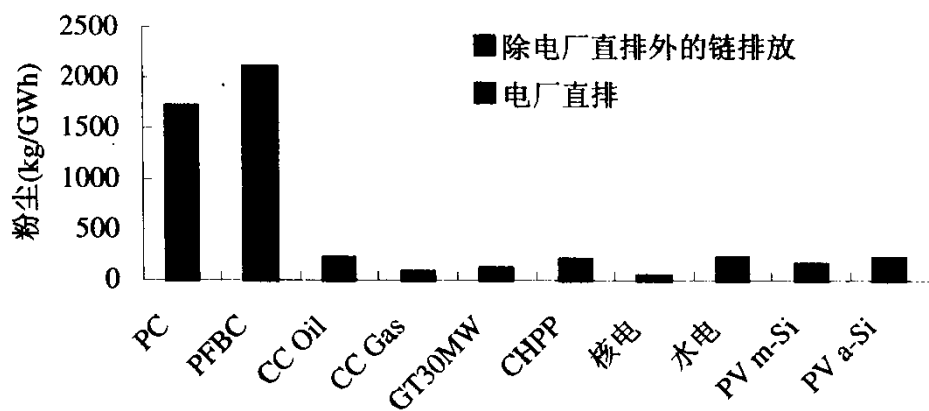


图 3 各能源链对粉尘排放的贡献

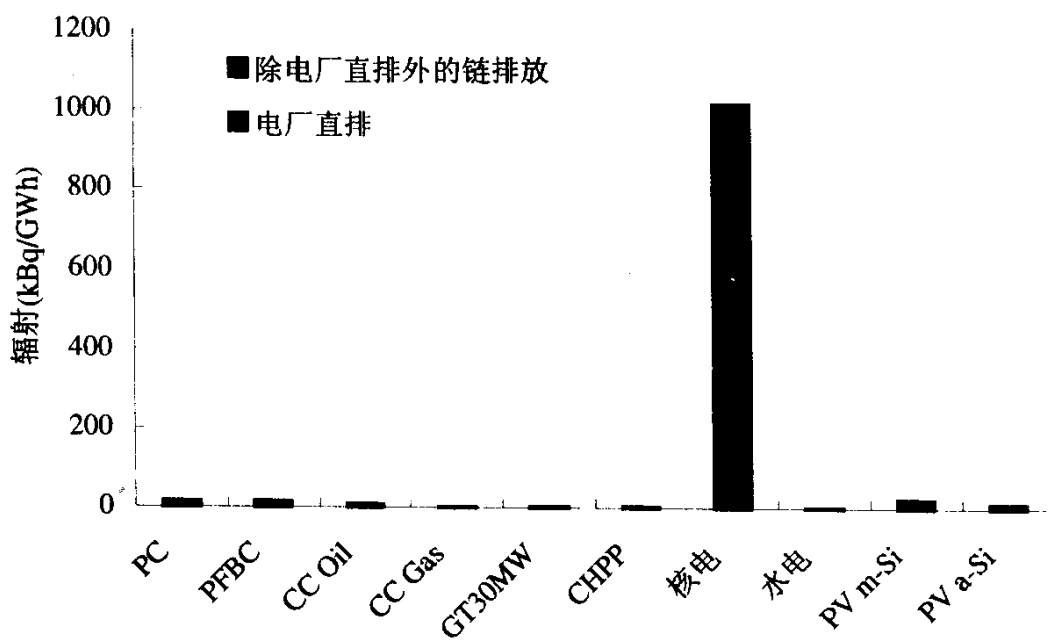


图 4 各能源链对辐射排放的贡献

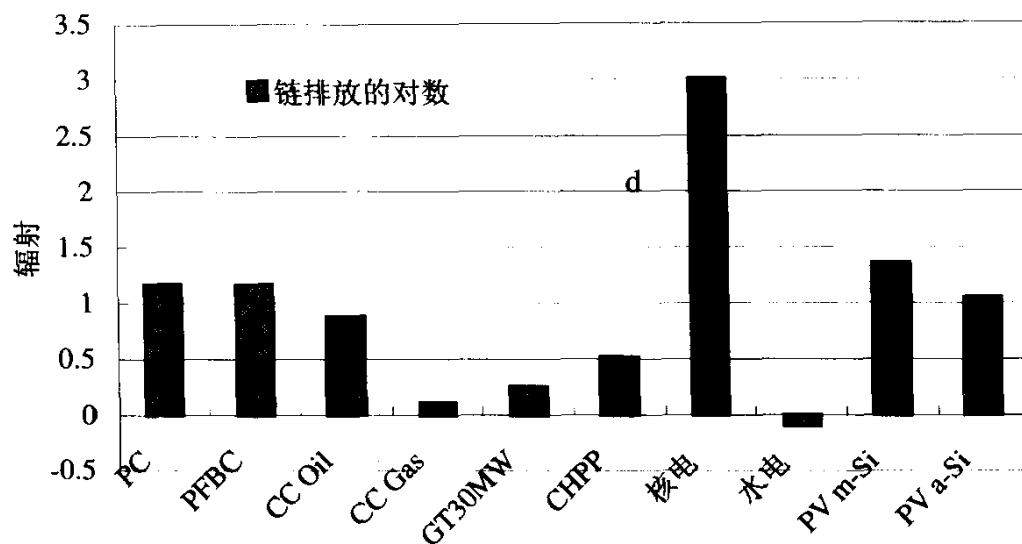


图 5 各能源链辐射量的对数值比较图

2.2 各种能源链不同环节的污染贡献比较

能源链一般包括生产、运输、加工、转换、应用、后处理环节。在不同环节，能源的污染贡献不同。有些污染物在应用环节的排放较多，有些则主要出现在应用以外的其它环节。污染物在哪个环节出现，主要取决于其工艺类型、技术水平和政策措施。表 4 列出了煤的生命周期过程中 SO_2 排放的一些数据，并在一些环节同石油、天然气的情况作了比较。

煤在开采和运输过程中的 SO_2 排放很小。从生产和运输过程讲，煤同石油、天然气的 SO_2 排放相比没有很大区别。

表 4 能源生命周期过程的 SO₂排放

环节	项目	SO ₂ 排放量	备注
生产	煤	8.57mg/MJ	
	石油	3.58mg/MJ	
	天然气	3.75mg/MJ	
运输	铁路	2.46mg/tkm	
	公路	--	
	水路	1.22mg/tkm	
加工	煤→工业型煤	253.8mg/MJ	
	石油→燃料油	1.18mg/MJ	
转换	石油→汽油*	251mg/MJ	CO ₂ 排放量: 36254mg/MJ
	石油→柴油*	211mg/MJ	CO ₂ 排放量: 30705mg/MJ
	煤→石油*	307mg/MJ	CO ₂ 排放量: 96409mg/MJ
	煤→甲醇*	235mg/MJ	CO ₂ 排放量: 88472mg/MJ
	煤层气→甲醇*	0.56mg/MJ	CO ₂ 排放量: 17840mg/MJ
	焦炉气→甲醇*	353mg/MJ	CO ₂ 排放量: 50568mg/MJ
	电	(火)电生产 终端用电	2777mg/MJ 电 2750mg/MJ 电
应用	洗后动力煤	644mg/MJ	96.7%使用环节 623mg 0.04%运输环节 0.055mg 加工环节 0mg 3.26%能源系统 21mg

环节	项目	SO ₂ 排放量	备注
应用	工业型煤	1303mg/MJ	67.5%使用环节 880mg 0.01%运输环节 0.066mg 19.48%加工环节 253.8mg 12.96%能源系统 168.9mg
	低硫煤	639mg/MJ	98.6%使用环节 630mg 0.01%运输环节 0.051mg 加工环节 0mg 1.39%能源系统 8.9mg
	原煤	1507mg/MJ	99.3%使用环节 1496mg 运输环节 0.066mg 加工环节 0mg 0.7%能源系统 11mg

资料来源 刘炳江 (1998); (Han, 1997);带*的数据来自中国科学院等 (1997)。

煤和石油在加工转换过程中可以转换成其它燃料形式，其SO₂排放同具体转换方向相关。可否选择转换，这更多地取决于转换效率和经济费用。需要指出的是，火力发电过程中排出大量的SO₂。生产1MJ电大约需要3.27MJ燃料，SO₂排放量为2758mg，链排放为2777mg，比开采和运输环节大得多。

与瑞士的情况不同，中国二氧化硫排放主要出现在应用环节，主要原因是中国生产工艺落后，许多工厂没有脱硫装置，煤的质量低，含硫量高。以煤最终用于燃烧发电为例，瑞士粉末煤燃烧发电厂(PC)的二氧化硫链排放量最高，为611Kg/GWh。按中国能源统计年鉴推荐的电力当量计算(国家统计局，1998)，1KWh = 3596KJ 则瑞士电厂二氧化硫排放量为170mg/MJ。中国火力发电厂SO₂排放量为2777mg/MJ是瑞士的16倍多；以低硫煤应用过程SO₂排放量623mg/MJ计，也是瑞士的近4倍。

洗煤对降低 SO_2 排放有重大的作用。原煤应用过程中 SO_2 排放量为 1507mg/MJ ，洗煤之后，动力煤的 SO_2 排放量仅为 644mg/MJ ，是原煤的 44% ，大大降低了对环境的影响，而且提高了能源效率。工业型煤的加工和应用也可以降低 SO_2 排放，约为 1303mg/MJ ，是原煤的 86% ，比洗煤效果略差一些。推广洗煤和型煤加工对保护环境都是非常有益的。

3 能源消费对中国环境的影响

中国能源消费的环境影响主要表现在空气污染上。中国的空气污染以煤烟型为主，二氧化硫和烟尘是主要污染物，这同中国以煤为主的能源结构与技术落后密切相关。中国排入大气中的 85% 的二氧化硫、 70% 的烟尘、 85% 的二氧化碳和 60% 的氮氧化物来自煤的燃烧 (阎长乐, 1997)。一些机构的估计值更高，联合国环境署 (UNEP) 的研究认为由于中国对煤炭生产过于注重产量而忽略质量，许多商品煤同原煤质量几乎一致，煤炭燃烧排放的二氧化硫占其排放总量的 90% (UNEP and NEPA, 1996)。

3.1 二氧化硫

前些年，中国二氧化硫的排放量连年增加，使城市大气污染程度不断加剧，图 6 列出了 1981—1996 年中国二氧化硫和烟尘排放量变化趋势。1981 年中国 SO_2 排放总量为 1371 万 t，1990 年，增加到 1502 万 t，1997 年，猛增到 2346 万 t，其中，工业来源的排放量为 1852 万 t，占 78.9% ；生活来源的排放量为 494 万 t (国家环保总局, 1998)。1998 年将到 20 万 t。其中：

二氧化硫排放量的增加是和煤消费量的不断增加相关的。

据郝吉明等(1996)估计,按中国目前的能源结构和污染物排放水平估算,到2000年我国二氧化硫将达到2400万吨。

国家环保局的环境监测数据表明,历年来,中国城市二氧化硫平均浓度一直超过国家二级标准,但浓度值出现了先增加后下降的趋势。1985年全国SO₂年均值浓度为105μg/m³,1987年上升到历史最高值111μg/m³,此后开始下降,1990年为93μg/m³,1995年为81μg/m³而国家二级标准只有60μg/m³。1997年,全国SO₂年均值浓度为66μg/m³,52.3%的北方城市和37.5%的南方城市长江以南,下同年均值超过国家二级标准。北方城市年均值为72μg/m³,南方城市年均值60μg/m³。以宜宾、贵阳、重庆为代表的西南高硫煤地区的城市和北方能源消耗量大的山西、山东、河北、辽宁等的城市SO₂污染较为严重。某些城市大气污染状况已达到或超过世界发达国家50年代、60年代污染最严重的程度,贵阳、重庆、临汾等城市的SO₂年平均浓度为环境空气质量二级标准的5倍(国家环保总局,1997,1998,1999)。

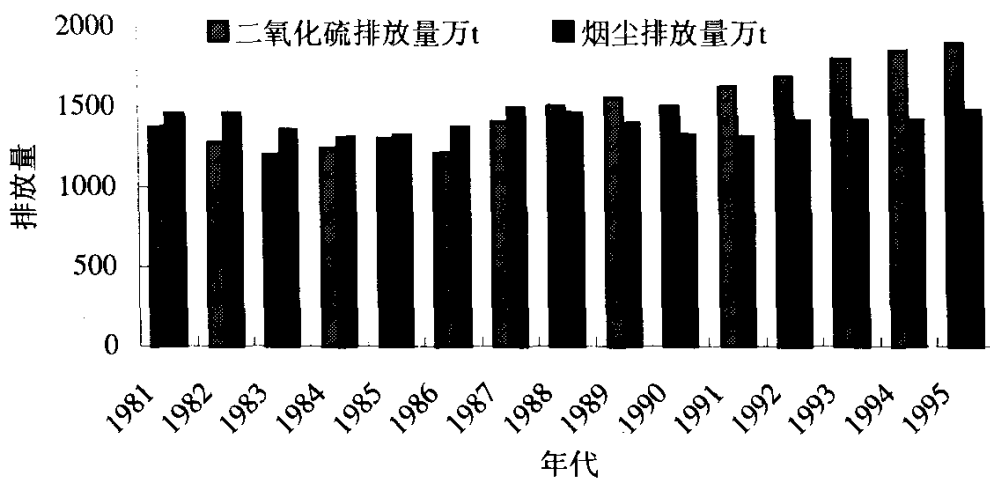


图6 SO₂和烟尘排放量

3.2 烟尘

中国烟尘排放量的增减不断反复，居高不下（见图6）。1981年全国烟尘排放量为1454万t，1984年降到历史最低1311万t，1987年升为1491万t，1991年再次降为1314万t，1995年重新增加到1478万t。由于统计方法的变化，1996年后，烟尘排放的统计值巨增，1997年全国烟尘排放总量为1873万t，其中，工业烟尘排放量1565万t，生活烟尘排放量为308万t。

3.3 酸雨

酸雨也是能源消费造成的严重的环境影响之一。研究表明中国酸雨中的硫酸根与硝酸根之比大约为6.4:1，由此可见，SO₂是造成中国酸雨的主要原因（中国环境科学研究院等，1995）。

中国酸雨危害呈现越来越重的趋势。据1985年，54个城市酸雨监测统计，pH年均值分布范围为4.61~4.78，其中，pH值低于5.6的城市有12个，占监测城市的22%；1990年，降水pH年均值分布范围为3.88~7.49，pH值低于5.6的城市大约占监测城市的50%。此后降水pH值低于5.6的城市基本上在50%左右波动，酸雨频率增加。1995年，降水pH值低于5.6的酸雨区面积占全国国土面积的30%左右。

1998年中国降水年均pH值范围在4.13~7.79之间，其中降水年均pH值低于5.6的城市有131个，占总城市的52.8%。酸雨侵蚀了中国一半以上的城市。73%的南方城市降水年均pH值低于5.6，其中南昌、洪江等13个城市pH值等于或低于4.5。