

2010

煤炭的真实成本

——大气污染与公众健康——





2010年7月，云南宣威电厂。© Simon Lim/ 绿色和平

作者

尚 琪 中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所

邹存国 中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所

周少磊 中国疾病预防控制中心 环境与健康相关产品安全所

项目协调员

杨爱伦 绿色和平

江雍年 绿色和平

孟 葳 绿色和平

十大公众预防燃煤空气污染小常识

1. 每天关注空气质量预报，以便适当安排户外活动，时时提高自我保护意识。
2. 当空气达轻微污染(国家空气污染指数Ⅲ级)时，老人、小孩、孕妇等敏感人群要特别注意自身健康状况，并尽量减少户外活动，如有不适需及时就诊。
3. 当空气达中度污染(国家空气污染指数Ⅳ级)时，大家要尽量避免户外体育活动，外出时戴上口罩等防护工具。
4. 经常开窗换气，让空气流通，保持室内空气新鲜。
5. 绿色植物是室内空气净化的好帮手，可以在室内种植常春藤、仙人掌、吊兰、虎尾兰、芦荟等植物。
6. 在选择办公、居住的地点时，要特别关注周围的环境是否远离火电厂之类的污染源。
7. 夏季晨练的时间不宜早于6点，因为夏季空气污染物在早晨6点前最不易扩散，是污染的高峰期。
8. 室内燃煤时，要使用通风的烟囱，并定期清理。
9. 请使用节能、环保的家用电器；电冰箱要采用自然制冷冰箱。
10. 培养良好的生活习惯，比如随手关灯、关闭身边待机的电器。节约每度电，响应低碳生活。

保护环境，为全人类的健康，是我们共同的责任！

术语列表

粒径 (Dp) :	表示大气颗粒污染物大小的指标, 是反映大气颗粒物最重要特性的指标, 决定着大气颗粒物在空气中的停留时间、沉降速度、在人体呼吸道的沉积部位等, 与健康损伤效应直接相关。 一般而言, 颗粒物的粒径越小, 其健康危害越严重; 而且不同来源的颗粒物, 其各种粒径颗粒物的成分构成不同; 同时颗粒物也是构成灰霾的主要成分。
总悬浮颗粒物 (TSP)	指大气中所有粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 含液体、固体或固液结合存在的, 并悬浮在空气中的所有粒径的颗粒物, 包括可吸入颗粒物 (PM ₁₀)、细颗粒物 (PM _{2.5}) 等。
可吸入颗粒物 (PM ₁₀)	指大气中粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 因可到达人体呼吸道深部而受关注, 能长时间漂浮于空气中, 又称飘尘。
细颗粒物 (PM _{2.5})	指大气中粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 在空气中的悬浮的时间较长, 易进入呼吸道深部和肺泡, 对健康危害极大。
烟尘	燃煤过程中总悬浮颗粒物的一种释放形式。
硫氧化物 (SO _x)	大气中硫氧化合物的总称, 主要成分有二氧化硫 (SO ₂)、三氧化硫 (SO ₃) 等, 其中 SO ₂ 数量最大, 危害也最为严重。
氮氧化物 (NO _x)	大气中氮氧化合物的总称, 主要成分有一氧化氮 (NO)、二氧化氮 (NO ₂) 等。
多环芳烃类 (PAHs) 物质	一类含多苯环结构的碳氢环境污染物, 是重要的已知致癌物。燃煤过程中可排放这类污染物。
靶器官效应	指外源化学物进入人体后对特定组织、脏器的损伤效应。
食物链	自然生态体系中, 各种生物彼此之间由于摄食的关系所形成的联系。食物链具有强大的富集浓缩作用, 环境有害物质在食物链的逐级传递过程中, 浓度逐级增加。如: 鱼体内的甲基汞浓度经过食物链的富集, 可高达水体浓度值的上千倍。食物链的富集作用是环境污染物危害健康的一个重要条件。
粗死亡率与调整死亡率	粗死亡率, 又称死亡率, 反映人群的总死亡水平; 调整死亡率是参照某一标准人口 (如人口普查数据) 计算而得的死亡率, 用于比较分析不同时期或不同地区间的死亡率差异, 以避免因人群年龄、性别构成不同所造成的影响。调整死亡率不是真实的比率。
死亡原因顺位	指按各类死因构成比的大小由高到低排列的位次, 说明各类死因的相对重要性。2005 年我国人群死因排名前三位的是: 脑血管疾病、恶性肿瘤和呼吸系统疾病。



2007 年 1 月 24 日, 山西临汾一电厂附近的工人正在铲煤。
©Natalie Behring/ 绿色和平

编者的话

中国目前是全球经济发展速度最快的国家之一, 对能源的需求量也在逐年递增, 其中煤炭在能源消费结构中约占 70%, 仍然是中国大气的主要污染源。

《煤炭的真实成本——大气污染与公众健康》报告是由绿色和平发起, 委托中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所的研究人员完成的。本研究报告在综合了以往不同时期、不同地域、不同主题的研究基础上, 筛选最具代表性的研究成果和案例, 系统地总结、归纳和解析燃煤大气污染对普通公众的健康影响, 以帮助公众更科学、更深入地认知燃煤的健康危害。出于普及、提高的目的, 本报告尽量使用通俗易懂的语言和案例进行阐述。

研究指出, 燃煤大气污染是影响我国公众健康的重要危险因素之一。燃煤大气污染物虽然排放浓度不高, 但排放量巨大, 在我国几种最主要能源的大气污染物排放总量中都占到了七成以上。燃煤大气污染对公众健康的危害通常是慢性的、长期的, 其影响以非特异性人体健康损害效应为主, 如引起人体抵抗力下降、人群发病率升高等, 这种慢性健康危害很容易被忽视。而当接触污染物的浓度持续达到一定剂量时, 也会引起特异性的靶器官损伤, 如诱发呼吸系统疾病、心脑血管系统疾病、肿瘤、新生儿出生缺陷、地方病等。这些与燃煤大气污染密切相关的疾病每年给中国造成相当大的健康经济损失和疾病负担。同时, 煤炭的大量使用还引起了我国酸雨、

生物多样性破坏等环境及与之相关的人类健康问题。

从医学的角度来看, 大气污染物与一些疾病的关联已得到广泛的论证。但从公众健康的角度来看, 大气污染与各种相关疾病的发病率及其趋势之间的关联存在着不确定性。目前国内在大气污染和公众健康方面的研究还存在着诸多不足, 其中最主要的就是相关信息、数据的缺乏, 既缺乏燃煤大气污染物排放 (如氮氧化物、汞等) 的数据, 也缺乏相关疾病发病率及其发展趋势的数据。其次, 是缺乏全国性的人群健康调查、监测数据, 大多数现有的研究都是集中于某个地区或城市, 数据也相对较陈旧。随着全社会对环境与健康问题的关注度日益提高, 大气污染物暴露水平与人群健康危害的定量研究应该成为今后的主要研究方向。

鉴于时间和研究规模的限制, 本报告尚有不尽如人意之处, 衷心希望有关专家、读者提出宝贵意见。

编者

2010 年 8 月

序

环境和健康看似是两个领域，实则密切相关。作为一个环保组织，绿色和平在接触大量环境课题的同时，也关注着环境变化对人体健康的影响。

煤炭作为中国的第一大环境问题，也威胁着公众健康，特别是燃煤引发的大气污染，给中国公众的健康带来了极大的危害。然而由于燃煤大气污染对人体健康的影响作用通常是慢性的、长期的，大多数公众对这个问题还没有给予足够的重视。同时，国内也缺乏比较全面而又通俗易懂的燃煤大气污染与健康的相关读物。就是在这样的背景下，绿色和平协同中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所的研究人员，发布了本报告，希望能为普通公众、媒体以及相关政策制定者更好地了解相关知识提供参考。

这份《煤炭的真实成本——大气污染与公众健康》报告已经是绿色和平第二次与中国疾病预防控制中心合作了。上一次合作是在四年前，中国疾病预防控制中心的研究人员参与了绿色和平等机构发起的“中国煤炭的真实成本”的研究项目，为评估中国煤炭使用的健康损失提供了很多扎实的信息与经验。当时的研究表明，燃煤导致的健康经济损失为44.8元/吨，占煤炭燃烧环境成本的近一半。

这次我们两家机构再次联手编写这份读物，希望通过典型的案例，深入浅出地将大气污染对健康的影响做一次系统性的梳理和阐述，以提高公众相应的自我健康保护意识，并引起全社会对相关议题的更多关注。

绿色和平气候与能源项目经理 杨爱伦

2010年8月于北京



2010年6月，山西大同二电厂外，排成长队的运煤车 © 赵钢 / 绿色和平

目录

内容摘要

第一部分 煤炭消费与大气污染概述

第二部分 燃煤导致的大气污染对公众的健康影响

1. 环境与健康的基本概念
2. 燃煤产生大气污染物的健康影响综述
3. 大气污染物的迁移和扩散
4. 大气污染物的人体暴露途径及体内转化
5. 健康影响

5.1 人群的急性健康危害效应

5.2 人群的慢性健康危害效应

5.2.1 呼吸系统疾病

5.2.2 心血管疾病

5.2.3 恶性肿瘤

5.2.4 出生缺陷

5.2.5 地方病

5.2.6 非特异性影响

5.3 间接健康危害

5.3.1 气候变化

5.3.2 酸雨

5.3.3 臭氧层破坏

5.3.4 影响生物多样性

第三部分 大气污染所致健康损失的分析

第四部分 政策建议

参考文献

08

09

12

13

14

14

14

17

17

17

17

19

20

20

22

23

25

25

25

25

26

27

29

31

内容摘要

1. 燃煤是我国大气污染的最主要原因。全国烟尘排放的 70%，二氧化硫排放的 85%，氮氧化物的 67%，二氧化碳的 80% 都来自于燃煤。我国电力行业的煤炭消费占到全国消费总量的 50% 以上，是大气污染物的最大排放者。
2. 燃煤火电厂大气污染物的可扩散范围非常广，可迁移到周围数公里甚至数千公里外。例如含汞颗粒物可扩散到 1000 公里之外，相当于上海到广州的距离。这意味着，远离污染源的人群并不能完全避免环境污染的影响。
3. 燃煤大气污染物对人体健康的危害是慢性、长期的，因此很容易被忽视。其危害以非特异性健康危害为主，如引起正常生理功能、免疫功能下降，对外界污染的敏感性增加等，对儿童、慢性病患者和老年人等敏感人群的影响尤为显著。
4. 虽然燃煤污染物在大气中浓度和人群暴露水平偏低，但是有些物质能长时间贮存在组织和器官中，在暴露人群体内的浓度达到一定水平时，也会影响人体的健康。
5. 2008 年，我国与大气污染有关的死亡人数达到 50 万，其中婴儿死亡所占比例高达 1/10。
6. 燃煤大气污染可使呼吸系统疾病发病率明显升高。根据太原市案例，燃煤污染区咳嗽、咳痰的发生率是对照区的 2 倍，肺炎和支气管炎的发病率是对照区的 3 倍。
7. 燃煤大气污染可引起老年人的心血管疾病死亡率升高。沈阳市一研究表明，在基础暴露水平的条件下，当总悬浮颗粒物每增加 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，总人群心血管病死亡率增加 1.22%，而老年组的心血管死亡率升高 4.3%。
8. 燃煤大气污染物中含有多环芳烃类（PAHs）等致癌物质。与大气污染联系最紧密的肺癌在我国人群恶性肿瘤死亡率中高居榜首。
9. 燃煤污染可引起新生儿出生缺陷率的升高，孕期暴露于燃煤污染物中会对婴儿的神经系统发育产生不良影响。根据重庆铜梁县的案例，电厂运行期间，大气中多环芳烃类（PAHs）物质含量提高到平时的 3.5 倍，暴露于此环境下出生的婴儿的神经系统发育指标迟缓率比普通环境下出生婴儿明显升高。
10. 燃煤大气污染造成的健康、经济损失巨大。2003 年，我国由于空气污染引发的过早死亡以及疾病的经济损失为 1573 亿元，占到当年 GDP 的 1.16%。2005 年，燃煤导致的健康经济损失为 44.8 元 / 吨，占到煤炭燃烧环境成本的 49%。

第一部分

煤炭消费与大气污染概述



2008 年 8 月，山西省朔州市神头电厂附近，等待过秤的排队运煤车。© Simon Lim / 绿色和平

煤炭在我国一次能源消费中占 70% 左右，高出世界平均水平 40%，是我国经济发展和人民生活水平提高的能源基础。我国煤炭的开采和消费量均排世界第一，2009 年的煤炭消费量已突破 30 亿吨¹，超过排名第二位到第五位的四个国家的消费量总和²。如图 1-1 所示。

我国的煤炭消费结构中，电力用煤比例最大，占到全国煤炭消费的 50% 以上。至 2009 年底，全国火电装机 6.51 亿千瓦，占总装机容量的 74%³。中国的电力行业是全世界最大的煤炭消费行业。如图 1-2 所示。

燃煤过程中可产生多种大气污染物，主要包括总悬浮颗粒物 (TSP)、硫氧化物 (SO_x)、氮氧化物 (NO_x)、多环芳烃类 (PAHs) 物质、重金属元素 (如汞、镉、铅) 以及氟和砷等。

长期以来，以煤为主的能源结构是影响我国大气环境质量的主要因素。全国烟尘排放的 70%，二氧化硫排放量的 85%，氮氧化物的 67%，二氧化碳的 80% 都来自于燃煤⁴。2002 年，燃煤电厂向大气排放汞的比重在五大排放源中高达 55%⁵。

京津冀、长三角和珠三角三大城市群占全国 6.3% 的国土面积，却消耗着全国 40% 的煤炭。因为大气污染物排放集中，重污染天气在此区域内大范围同时出现，是我国多年来大气污染的重点治理区域⁶。表 1-1 为全国主要大气污染物排放表。

与燃煤大气污染相比，室内燃煤的危害更严重、更直接、

更容易被忽视。目前，我国省会城市中居民直接燃煤的比例已大幅下降，不过室内燃煤在中小城镇和农村仍然普遍。室内燃煤危害的研究，为我们了解燃煤所导致的污染物与人体健康之间的关系提供了重要的信息。

2008 年 10 月，由绿色和平、美国能源基金会等多家机构联合发起，国家发改委能源研究所、天则经济研究所、山西省社会科学院、中国疾病预防控制中心等单位参与撰写的我国首份煤炭外部成本综合性研究报告——《煤炭的真实成本》发布。报告较全面的概括了煤炭的各种外部成本，指出每使用一吨煤炭的外部成本是 150 元人民币。2007 年我国煤炭造成的环境、社会和经济等外部损失达到人民币 17450 亿元，相当于当年国内生产总值的 7.1%⁸。该报告指出，由于市场和政策失灵的结果，致使环境损失等外部成本没有纳入煤炭价格体系当中，我国的煤炭燃烧所造成的环境问题一直被淡化。

在高昂的外部成本中，燃煤导致的死亡、呼吸和循环系统疾病以及慢性支气管炎疾病等人体健康损失约占全部燃煤环境成本的 49%⁹。2003 年，由于空气污染引发的过早死亡和疾病的经济损失为 1573 亿元¹⁰。由于燃煤大气污染物危害人体健康的特点是低浓度、慢性、长期作用，所以受影响的人没有明显特征性表现，但会有虚弱易病、久病难愈等不良感觉。这种非特异性健康损失还无法准确地计算出来。因而，特别有必要通过此研究将燃煤污染对公众的健康影响进行系统地阐述。

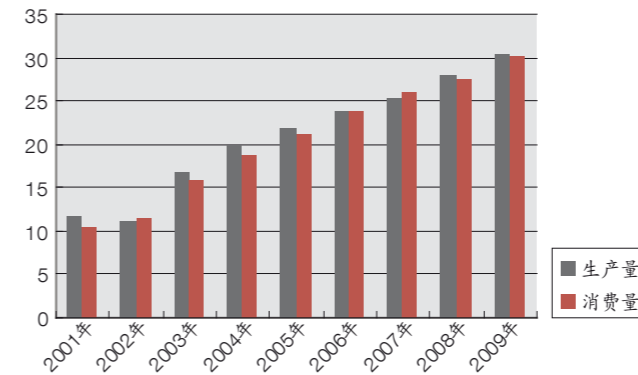


图 1-1 我国近些年煤炭的生产量和消费量 单位：亿吨

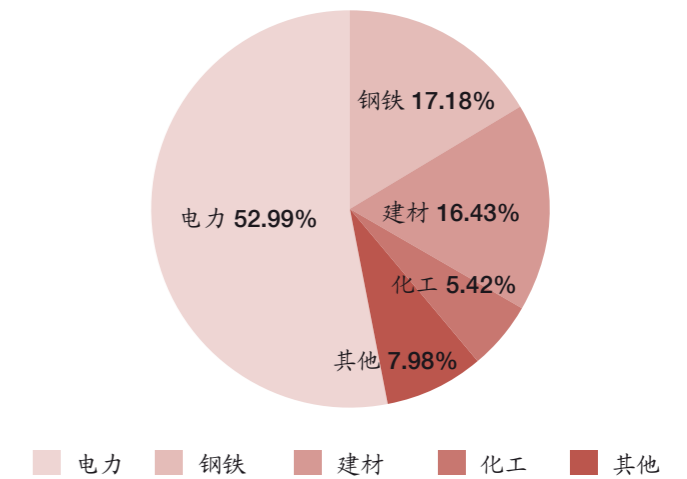


图 1-2 2007 年各行业煤炭消费比例

表 1-1⁷ 全国主要大气污染物 (单位：万吨)

年度	二氧化硫			烟尘			氮氧化物		
	合计	工业	生活	合计	工业	生活	合计	工业	生活
2001	1947.8	1566.6	381.2	1069.8	851.9	217.9			
2002	1926.6	1562	364.6	1012.7	804.2	208.5			
2003	2158.7	1791.4	367.3	1048.7	846.2	202.5			
2004	2254.9	1891.4	363.5	1094.9	886.5	208.4			
2005	2549.3	2168.4	380.9	1182.5	948.9	233.6			
2006	2588.8	2237.6	351.2	1088.8	864.5	224.3	1523.8	1136	387.8
2007	2468.1	2140	328.1	986.6	771.1	215.5	1643.4	1261.3	382
2008	2321.2	1991.3	329.9	901.6	670.7	230.9	1624.5	1250.5	374
2009	2214.4	1866.1	348.3	847.2	603.9	243.3			

注：氮氧化物从 2006 年开始监测，生活排放量中含交通源排放的氮氧化物。

① 煤炭的外部成本指煤炭开采、加工、储存、运输、消费过程对环境造成各种损害的成本，包括气候变化、空气和水体污染、土地破坏、健康损失等各类环境问题的综合性成本。

第二部分

燃煤导致的大气污染 对公众的健康影响



2007年1月25日，山西临汾，一个患呼吸系统疾病的女孩正在一家诊所治病。
© Natalie Behring/绿色和平

2008年，山西一焦化厂冒出的浓烟 © Simon Lim/绿色和平

1. 环境与健康的基本概念

人群：环境污染物会对人类健康产生危害，这种说法针对的是整个暴露人群，而并非具体的暴露个体，因此并不是所有的暴露个体都会患病。

有阈值和无阈值化合物：环境污染物可分为有阈值化合物和无阈值化合物。一般的环境污染物都是有阈值化合物，即该化合物只有在达到或是大于某剂量水平的情况下才会产生健康危害效应，低于此剂量则不会产生危害作用；而无阈值化合物是指在大于零的剂量暴露下均可能发生有害健康效应，各种致癌物属于此类化合物。

暴露水平：又称生理负荷，为衡量人体内有害化学物质水平的指标。有害化学物质的水平低于阈值时，为可接受的暴露水平。

环境有害因素可引起不同的人群健康效应，效应由弱到强可分为五级，呈金字塔形分布，如图 2-1 所示。

虽然此处将健康效应分为五级，但是这五级只是人为划分，在现实中强、弱的健康效应之间并没有严格界限。处在底层的第一级和第二级的暴露人群不会出现明显的症状和体征，只是出现一些非特异性的反应，如虚弱、免疫力下降等；而处在顶层三级的暴露人群将有可能出现不良健康效应。每一级别的效应在人群中出现的比例不同：最弱的健康效应，如生理负荷增加、生理代偿性变化等，所占比例最大；最强的危害、最严重的效应为死亡，所占比例很小。

环境污染物对普通公众的危害主要以前三级非疾病的形式出现，体现为低浓度、长时间、反复作用于人体的形式，引起慢性危害，这种作用形式也是环境污染物危害人体健康的特点。

易感人群：从图 2-1 中可以看出，人群对环境有害因素的反应存在着差异。尽管多数人在环境污染物作用下仅有生理负荷的增加或出现生理性变化，但是仍有少数人会出现机体正常功能的严重失调、中毒，甚至是死

亡。通常把这类对环境有害因素反应更为敏感和强烈的人群称为易感人群（敏感人群）。与普通人群相比，易感人群会在更低的暴露水平下出现有害健康效应；或者在相同的环境因素变化条件下，易感人群中出现不良效应的比例会更高，反应更重。儿童、老年人、孕妇及严重的慢性病患者都属于易感人群。

健康累积效应：环境污染物对健康的危害具有累积效应，包括剂量累积和健康损害累积。在长期的暴露过程中，污染物在暴露人群体内的剂量缓慢增加，健康损伤也随之累积；当达到一定浓度和程度时，机体就会出现某种异常，如发病等。一般而言，环境污染因素所导致的健康损害（如燃煤引起地方性氟中毒等），在目前的科学技术发展水平上没有特效的治疗手段，但是可以采取相关措施进行有效的预防。

大气监测指标：通常选择二氧化硫和总悬浮颗粒物作为大气监测指标，主要是基于被监测物质的理化特性、可监测性以及监测所需的经济和技术条件等因素的考虑。但是这并不表明，没有进行常规监测的其他污染物不会对人体健康产生危害。例如燃煤过程中排放二氧化硫和总悬浮颗粒物的同时，也排放其他的污染物，而且其他污染物的排放量与大气监测指标物质的排放量具有一定的比例关系。因此，大气监测指标的浓度可以指示和代表污染源对大气的污染程度。

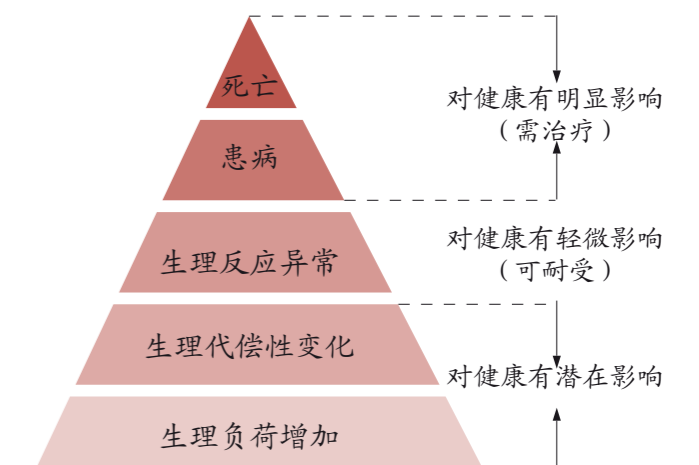


图 2-1 环境有害因素引起的人群健康效应“金字塔”

① 机体动用功能储备来对抗环境变化的一种代偿性生理反应过程，以维护正常生理功能平衡。如：跑步后心跳加快，就是一种正常生理代偿性变化现象。

2. 燃煤产生大气污染物的健康影响综述

燃煤过程中排放的大气污染物多达数十种。这些物质作用于人体产生各种危害，影响机体各个系统的功能，有时甚至会危害到生命。除极端情况外，大气中的污染物浓度不会达到引发急性毒性的阈值，但对长期暴露于一定污染物水平下的人群会产生潜在的健康影响。图 2-2 中总结了主要大气污染物对人体健康的慢性影响。

3. 大气污染物的迁移和扩散

大气污染物排放至空气中后，会随空气流动发生迁移和扩散。一方面污染物稀释，另一方面可将部分污染物扩散到更大的范围。此外污染物也可以从空气中逐渐沉降于水、土壤等环境介质中。迁移和扩散过程可受多种因素影响，如污染源排放情况（排放量、排放高度等）、气象因素（风向、风速等）和地形因素等。

电厂燃煤污染物在多种因素综合作用的影响下，会对其周围数公里甚至数十公里范围内的人群造成危害。一般来说，离污染源（火电厂）的距离越近，污染越严重，对人群健康危害越大。这并不意味着远离污染源的人群就不会受到任何影响。随着迁移和扩散，更广泛的人群在一定程度上仍会接触到大气污染物。以细颗粒物（PM_{2.5}）为例，它的扩散距离可以达到数千公里，造成大范围的污染，甚至成为全球性问题。表 2-1 为主要的燃煤大气污染物的迁移和扩散过程。

4. 大气污染物的人体暴露途径及体内转化

如图 2-3 所示，大气污染物主要通过呼吸道进入人体，小部分的污染物（主要为总悬浮颗粒物、重金属等物质）也可以降落至食物、水体或土壤，通过进食或是饮水，经消化道进入体内。还有些脂溶性的污染物（如多环芳烃类、砷等）可通过直接接触粘膜、皮肤进入机体。除此之外，燃煤排放的某些污染物（如多环芳烃类）可能还会通过胎盘转运至胎儿体内从而造成健康危害。

人体接触外源化学物后，会经历吸收、分布、代谢和排泄四个过程。依接触方式和化学性质的不同，外源化学物可经皮肤、肺（呼吸）粘膜和消化道吸收。经皮肤、粘膜吸收的直接进入血液循环至全身各处；经消化道吸收后到肝脏，代谢后分布至全身各组织器官。作为所有化学物的代谢中心，肝脏内各种酶的作用使外源化学物发生各种复杂的代谢转化反应，相应地其化学毒性也会有增强、减低和不变三种变化。外源化学物及其代谢产物可经尿、粪、汗、呼气等各种途径排出体外。

外源化学物在体内的过程中，有的物质可以直接或间接对靶器官产生毒性作用，有的物质则可以蓄积在某些组织器官内，产生慢性危害。具体过程如图 2-4 所示。

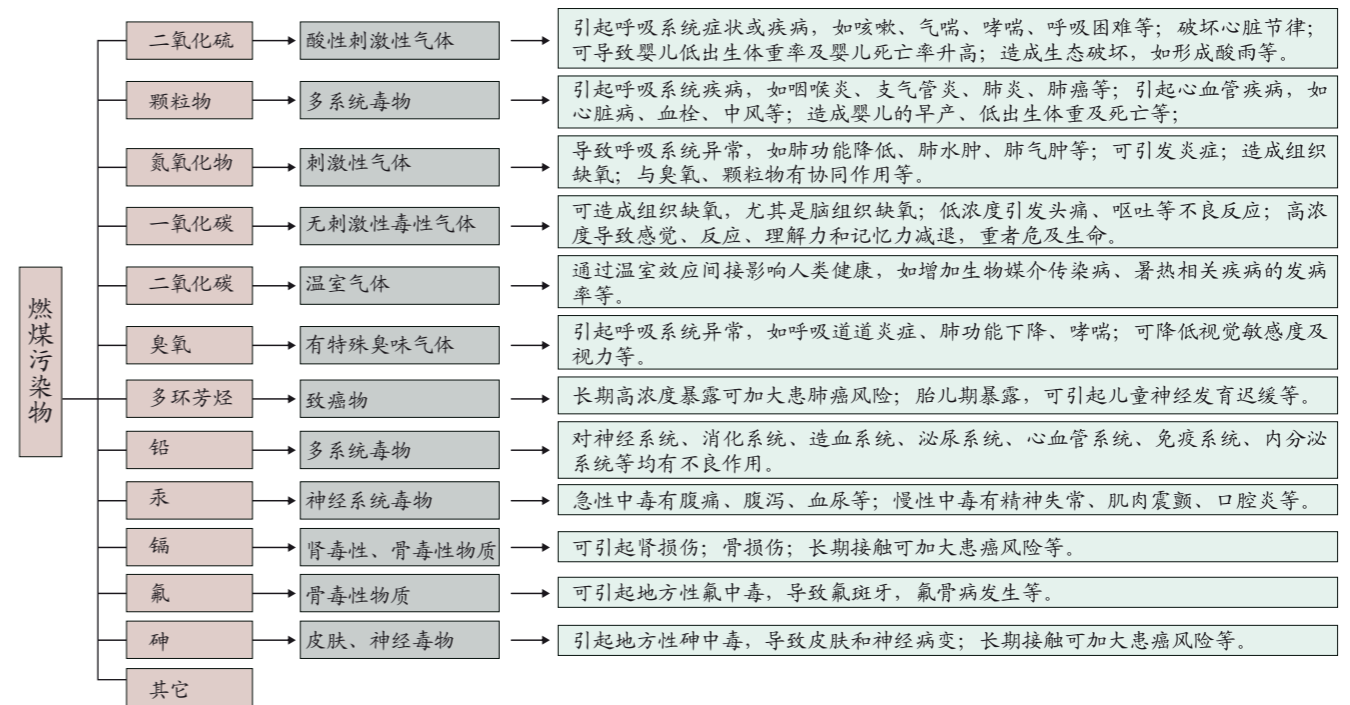


图 2-2 主要燃煤大气污染物及其健康危害

表 2-1 主要大气污染物的迁移扩散¹¹

污染物	迁移扩散
二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳和臭氧等	进入大气后，可随空气流动而向下风向迁移；也可以垂直上升至大气平流层。迁移过程中可与其他物质发生化学反应，如二氧化硫在大气迁移中可被氧化为三氧化硫，遇水或是金属氧化物形成硫酸盐颗粒；一氧化碳可被氧化为二氧化碳等。
可吸入颗粒物（PM ₁₀ ）和细颗粒物（PM _{2.5} ）	一般说来，可吸入颗粒物（PM ₁₀ ）在空气中受重力、浮力和拖拽力的作用，扩散范围从几十米至数十公里。细颗粒物（PM _{2.5} ）可扩散至数百公里至数千公里之外。
多环芳烃类（PAHs）物质	大气中的大多数多环芳烃吸附在总悬浮颗粒物表面，尤其是粒径小于 5 μm 的颗粒物上。这种物质可随小颗粒物一起迁移，在迁移中可与其他污染物发生反应形成其他污染物，最终随颗粒物一起沉降至地表。
铅、镉	燃煤释放的铅、镉污染物的扩散主要是以烟尘的形式排出，范围主要与烟囱高度和风向风力有关。一般来说，烟囱高度 30 ~ 40 米，烟尘扩散范围 500 米左右；烟囱高度 100 米，烟尘扩散范围可达 2000 ~ 3000 米。
汞	金属汞的气态形式称为汞蒸气。大气中的气态和颗粒态的汞随风飘散，其中汞蒸气在大气中停留的时间较长，颗粒结合态约传输 100 ~ 1000 公里就会沉降到大地或水体中。

① 不溶于水而溶于脂肪、有机溶剂的一类化合物。

② 酶是生物体内存在的参与化学物体内代谢、转化过程的必需物质。是生命活动的基础条件之一，酶活性的高低可以影响化学物毒性的大小。

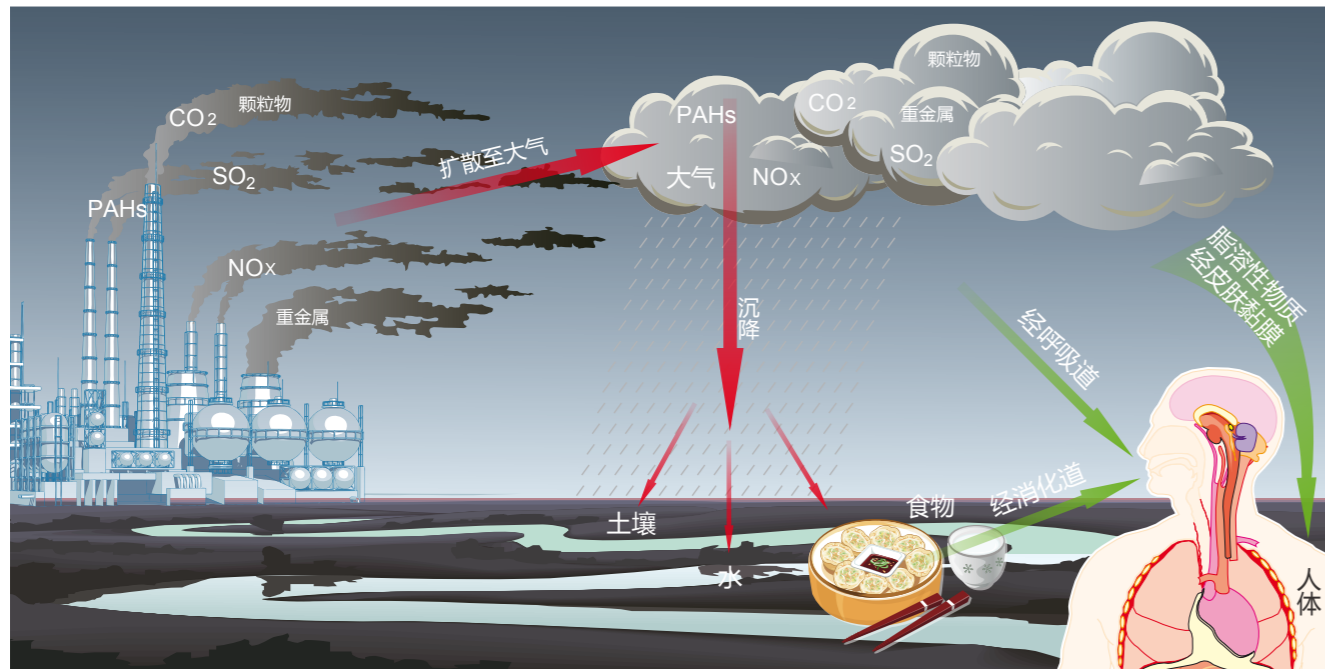


图 2-3 燃煤大气污染物的环境迁移和人体暴露途径示意图

5. 健康影响

燃煤大气污染物对人体健康危害不可忽视，根据健康危害表现可分为急性健康危害、慢性健康危害和间接健康危害三种。

5.1 人群的急性健康危害效应

大气污染物的浓度短期内在局部区域急剧升高，可引起人群的急性健康危害，导致病情恶化，死亡率增加。此类事件是由于燃煤产生的大量污染物在不良气候条件或是特定的地理条件下，不能充分扩散，积蓄在大气中，加重某些严重慢性病患者的病情，导致支气管炎、肺炎、心脑血管等疾病的急性发作，从而引起死亡。

1952 年冬季，英国伦敦发生了严重的烟雾事件，家庭及工业燃煤排放的污染物在高压、无风、湿度大、低温、盆地等特殊条件下，导致 4000 人在 4 天内死亡，以老人居多，死因主要为呼吸系统疾病和心脏病。在现代工业社会里，这种急性事件发生的概率已经被大幅度降低。

5.2 人群的慢性健康危害效应

人体的慢性健康危害效应是污染物在体内长期累积的结果，包括污染物在机体内的物质蓄积与功能损害蓄积。虽然暴露人群短期内不会出现明显的症状和体征，但慢性危害更为严重和持久。仅 2008 年，中国与大气污染有关的死亡人数就达到 50 万，其中婴儿死亡所占比例高达 1/10¹²。

燃煤的慢性健康危害以长期累积、逐渐影响的形式存在于地域范围更广、暴露基数更大的人群周围。大气污染物长久作用于人体可以产生各系统的损伤。按照表现形式划分，燃煤大气污染引起的人群慢性健康危害主要有

特异性健康影响，如：呼吸系统疾病、心血管疾病、肿瘤、出生缺陷、地方病等疾病和非特异性健康影响两种形式。

5.2.1 呼吸系统疾病

燃煤产生的很多空气污染物都可以直接作用于人体呼吸系统，例如二氧化硫、总悬浮颗粒物、氮氧化物、一氧化碳等。这些污染物进入人体后，首先损害人的呼吸系统，引起暴露人群出现各种呼吸系统疾病的症状和体征，如咳嗽、咽痛、呼吸困难、咽炎、肺炎等。呼吸道炎症反复发作，可以造成气道狭窄，气道阻力增加，肺功能不同程度的下降，最终会形成通气不畅的慢性阻塞性肺疾病，如肺气肿、慢性支气管炎等。

2004-2005 年我国呼吸系统疾病的死亡率为 96.28/10 万，占人群死亡总数的 15.81%，在我国人群死因顺位中排第三位¹³。

5.2.1.1 燃煤大气污染与成年人呼吸系疾病

已有研究表明，燃煤大气污染可使呼吸系统疾病发病率明显升高。例如 1999 ~ 2001 年进行的太原市 6292 名成人的呼吸系统情况调查¹⁴ 结果显示：燃煤污染区咳嗽、咳痰的发生率是对照区的 2 倍，而肺炎和支气管炎的发病率几乎是对照区的 3 倍。

燃煤大气污染除了导致呼吸系统症状和疾病的发病率升高外，还会引起呼吸系统疾病死亡率的升高。1991 年在黑龙江省哈尔滨、鹤岗和大庆三个城市进行的空气污染对居民健康影响的研究表明，三个城市呼吸系统疾病死亡率与空气污染程度呈正相关的关系¹⁵（结果如表 2-2 所示）。依据飘尘浓度，污染严重程度由高到低分别为：哈尔滨>鹤岗>大庆，而肺癌、肺心病、鼻咽癌和慢性支气管炎的死亡率由高到低的排序也是：哈尔滨>鹤岗

表 2-2 1991 年三城市几种主要呼吸系统疾病的死亡率（1/10 万）

城市	飘尘日均浓度 (mg/m ³)	肺癌		肺心病		鼻咽癌		慢性支气管炎	
		男	女	男	女	男	女	男	女
哈尔滨	1.138 ± 0.381	17.17	12.78	104.42	119.72	1.71	1.31	13.24	11.35
鹤岗	1.059 ± 0.592	6.03	0.94	82.31	92.62	1.32	2.27	5.22	5.77
大庆	0.255 ± 0.089	5.57	3.97	66.49	87.15	1.18	0.48	8.48	5.56

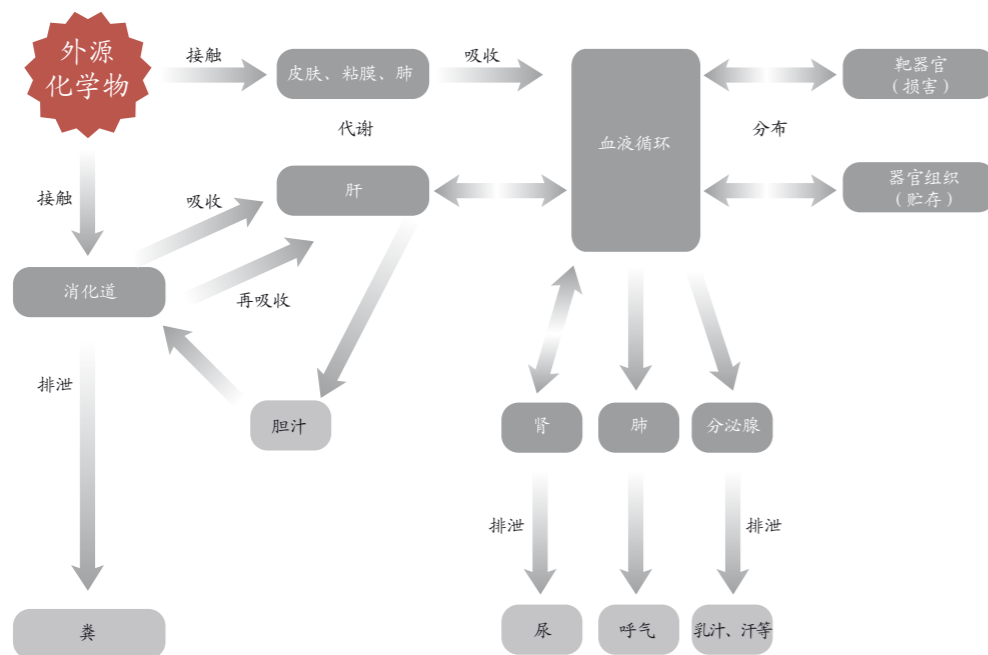


图 2-4 外源化学物在机体内的转运、转化过程

>大庆。在当地年平均大气污染水平条件下，总悬浮颗粒物浓度每增加 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，人群呼吸系统疾病死亡率就会增加 2.195%¹⁶。

5.1.1.2 燃煤大气污染对儿童的呼吸系统的影响

儿童正处在生长发育时期，各系统、器官尚未完全成熟，对环境有害因素的抵抗力弱，尤其是儿童呼吸系统对大气污染物有高度的敏感性。因此，燃煤产生的有害物质更容易对儿童机体产生危害，引起儿童呼吸系统症状和疾病发病率的升高。

1993 ~ 1997 年在兰州、重庆、广州和武汉四城市进行了城市空气污染与儿童呼吸系统健康的研究¹⁷。根据 1995 年大气污染物 (TSP、SO₂) 监测数据，将大气污染程度不同的四城市分为两组：兰州为一组，其余三城市为一组，来比较这两组城市儿童的呼吸系统症状和相

关疾病的患病率。在兰州的大气污染程度明显重于其余 3 个城市的同时，兰州市儿童的感冒咳嗽、感冒咳痰、感冒气喘、哮喘、支气管炎的患病率分别是其余三城市的 2.87 倍、1.57 倍、1.22 倍、1.23 倍、2.12 倍。

燃煤大气污染不仅会给儿童的呼吸系统造成很大危害，室内燃煤污染也会给儿童的呼吸系统带来沉重的负担。室内燃煤主要用于家庭日常生活和取暖，与室外大气污染有协同作用¹⁸，会加重室内的总悬浮颗粒物污染水平，导致儿童呼吸系统疾病和症状的发生率提高，也增加了儿童的因病入院就诊率。

除了诱发呼吸系统症状与提高疾病危险性外，燃煤大气污染还可引起儿童的肺功能异常、阻塞儿童气道，进而引起呼吸不畅、呼吸困难等呼吸道症状。



2007 年 1 月 25 日，山西临汾，一位医生正在给一个患呼吸系统疾病的儿童进行检查。© Natalie Behring/ 绿色和平

5.2.2 心血管疾病

燃煤过程中释放的总悬浮颗粒物、二氧化硫、一氧化碳等多种污染物都可以对人体的心血管系统产生作用，但大气污染物对心血管系统的影响机制尚不明确。目前的研究表明，颗粒物可能通过以下途径影响心血管系统：(1) 干扰心脏自主神经功能的调节；(2) 颗粒物本身或其某些组分直接进入循环系统诱发血栓的形成；(3) 刺激呼吸道产生炎症并释放细胞因子，后者通过引起血管损伤，导致血栓形成¹⁹。见图 2-5。

心血管疾病已成为我国人群首要的健康问题，2005 年已位居人群死亡原因首位。估计我国每年因心血管病死亡的人数约为 300 万。每死亡 3 人中就有 1 人是心血管疾病。相当于我国每天心血管病死亡 8400 人，每 10.5 秒就有 1 人死于心血管疾病²⁰。在中国，预防、控制空气污染对心血管疾病的影响已经成为一个重要的公共卫生问题。

5.2.2.1 燃煤大气污染对普通人群心血管系统的影响

国内很多关于大气污染和人群心血管疾病的研究都表明：大气污染越重，人群的心血管疾病的死亡率越高。从 1992 年到 2004 年的研究数据中可以看出，辽宁省本溪市、沈阳市空气污染程度重于浙江省杭州市，心脑血管和冠心病的死亡率也明显高于杭州市。(表 2-3)

5.2.2.2 燃煤大气污染对老年人心脑血管的影响

引发心脑血管疾病的危险因素有很多，除空气污染以外，还有高血压、高血脂、血糖异常、肥胖等，老年人对燃

煤的大气污染物更为敏感，因此老年群体通常是多种危险因素聚集的心血管疾病的高发人群。

2000 年前后在辽宁省沈阳市进行的关于总悬浮颗粒物与心血管疾病死亡率关系的研究²⁴表明：燃煤大气污染可引起老年人的心血管疾病死亡率升高。在基础暴露水平的条件下，当总悬浮颗粒物每增加 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，总人群心血管病死亡率增加 1.22%，而老年组的心血管死亡率升高 4.3%。此外，山西省太原市的一项研究²⁵也表明，大气中颗粒物和一氧化碳的增加会引起老年人各种心血管疾病，如：缺血性心脏病、心衰、心肌梗塞等疾病的死亡率升高。

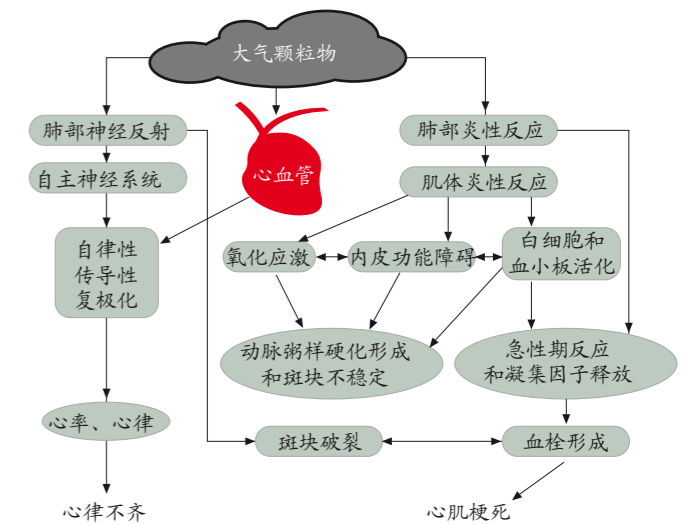


图 2-5 大气颗粒物对心血管系统影响的可能机制

表 2-3 中国部分城市大气污染状况和心血管死亡率

城市	年份 (年)	调查人数	污染物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			死亡率 (1/10 万)	
			TSP	PM ₁₀	SO ₂	心脑血管病	冠心病
杭州 ²¹	2002	3854933		113	46	132.06	25.66
	2003	3929213				151.05	29.14
	2004	4073969				149.68	28.11
沈阳 ²²	1992	3097353	467		133	160.8*	77.9
本溪 ²³	1994	667553	290 ~ 620		160 ~ 240	291.5	

*: 此数据为当地脑血管病的死亡率

① 机体免疫系统分泌的一类具有细胞免疫调节功能的蛋白质或多肽。

5.2.3 恶性肿瘤

燃煤大气污染物中含有多种致癌物，如多环芳烃类（PAHs）、苯、醛等物质。与肺癌相关的致癌物主要是多环芳烃类，代表物质为苯并（a）芘。苯并（a）芘进入人体后，只有少部分以原型形式排出体外，大部分留在体内，在人体各种酶的催化作用下，产生更为复杂、毒性更大的代谢物，此类代谢物可以与细胞的DNA分子发生不可逆的结合，从而启动致癌过程。

2004 ~ 2005年，我国人群恶性肿瘤的死亡占死亡总数的22.32%，居死亡原因第二位²⁶。与大气污染联系最紧密的肿瘤当属肺癌。肺癌位居我国城市中常见恶性肿瘤的首位，农村常见恶性肿瘤的第二位，且近年来发病率呈持续上升趋势。2005年全国第三次死因回顾抽样调查显示，中国人群肺癌的粗死亡率为30.83/10万，占全部恶性肿瘤死亡的22.70%²⁷。

中国预防医学科学院从20世纪70年代开始进行的长达20多年的宣威肺癌病因研究是一项室内燃煤污染引起肺癌高发的典型案例。该地区的案例研究帮助我们更好地了解燃煤释放的致癌物（如：多环芳烃类物质）对人体健康的影响。

在1973 ~ 1975年全国肿瘤死亡情况调查中，云南宣威县的肿瘤高发引起了广泛关注（如表2-4所示）。宣威县虽处于边远山区，但是其肺癌死亡率却是国内大、中城市的0.8 ~ 5.4倍，女性肺癌死亡率更高居全国之首。

宣威肺癌高发与当地的燃煤生活方式密切相关，当地属高寒山区，居民室内普遍采用开放式炉灶——“火塘”做饭、煮猪食、取暖。这种炉灶没有烟囱和炉桥，燃料在灶坑内燃烧的烟尘，造成室内极为严重的空气污染。

经过研究确定，室内燃煤空气中致癌性多环芳烃类（PAHs）物质，如苯并（a）芘等，是宣威肺癌的主要致病危险因素。燃烧烟煤比例越高的乡，肺癌调整死亡率越高；而且伴有室内苯并（a）芘浓度升高，肺癌死亡率也相应增高。这些致癌物属无阈有害物，即只要接触均可能存在致癌风险，应该引起人们的足够的重视。

表 2-4 宣威县和国内部分城市市区居民的肺癌死亡率比较（1970s）²⁸

地区	男		女	
	肺癌死亡率 (1/10万)	死亡率比 (宣威/各地)	肺癌死亡率 (1/10万)	死亡率比 (宣威/各地)
宣威	27.66		25.33	
上海	29.31	0.94	10.81	2.34
北京	14.81	1.87	11.31	2.24
天津	14.03	1.97	11.49	2.21
沈阳	18.55	1.49	12.31	2.06
成都	10.55	2.62	5.20	4.87
长沙	23.98	1.15	10.50	2.41
昆明	13.86	2.00	3.95	6.41

5.2.4 出生缺陷

出生缺陷也称先天畸形，是指婴儿出生时就存在的各种形态结构、智力或代谢方面的异常（不包括出生时损伤所引起的异常），是中国5岁以下儿童发病与死亡的主要原因之一。出生缺陷一般分为4种类型²⁹：（1）形态结构的先天性缺陷，表现为先天畸形；（2）生理和代谢功能障碍所致的先天性缺陷，表现为功能障碍；（3）先天智力低下，表现为智力障碍；（4）宫内发育迟缓，表现为出生低体重。神经管畸形（主要包括无脑儿和脊柱裂）是最常见的出生缺陷。

导致出生缺陷的危险因素有很多，例如遗传因素、父亲吸烟、孕期感染、孕期职业暴露、大气污染等。经统计，出生缺陷遗传因素约占25%，环境因素约占10%，而约占65% ~ 70%的原因是遗传和环境共同作用的结果³⁰。

在我国新生儿出生缺陷发生率最高的山西省，2006年新生儿出生缺陷率高达189.96/万，其中神经管畸形发生率为每万人102.27例，分别是全国的2倍和4倍。虽然服用叶酸可以有效降低神经管畸形的发生率，但仍不能完全控制神经管畸形的发生。究其高发的原因，环境污染是一个不容忽视的因素³¹。

2006年山西省煤炭的产量占全国的1/4，焦炭产量占2/5。煤炭在给山西经济带来发展的同时，也使其成为全国大气污染最严重的地区。同年，在国家环境监测总站公布的全国30个污染最严重的城市里，山西独占13名，而且包揽前5名。研究说明，1978 ~ 1980年间，在太原、大同、长治等工业较为集中的城市，工业区和受污染的郊区的新生儿出生缺陷率比城市居民区及邻近县明显升高，太原市污染区的出生缺陷率是邻近县区的9.57倍。见表2-5。

我国其他地区的研究都得到类似结论。本溪市是辽宁省的钢铁、煤炭工业城市，在上世纪末属于典型的燃煤大气污染城市。对本溪市1986 ~ 1994年出生的24744例新生儿的出生缺陷调查数据³³表明，新生儿畸形率随着研究区域大气污染程度的加重而增加，轻污染区、重污染区的孕妇所生婴儿畸形率分别是对照区新生儿畸形率的1.36倍和2.04倍。其中中枢神经系统畸形发生率约占1/3，居第一位。

2005年有文献报道，贵州省燃煤型砷中毒区近30年出生的先天性畸形发生情况的研究³⁴表明，当地出生缺陷的发生与燃煤高砷煤导致的污染密切相关。贵州省兴仁

县雨樟镇的行政村按燃煤含砷量分为砷中毒村（燃煤高砷煤并有砷中毒病例）和非砷中毒村（不燃煤高砷煤、无砷中毒病例）。该镇近30年来所有出生婴儿的出生缺陷发生情况数据显示，砷中毒村的畸形率是非砷中毒村畸形率的2.05倍。

尽管出生缺陷的影响因素有很多，但是不可否认环境因素对出生缺陷的发生也有着重要影响，大气污染已经成为儿童出生缺陷率高发的危险因素之一。在长期的燃煤污染物暴露下，进入体内的污染物对生殖细胞遗传物质的损伤、对胚胎发育过程的干扰和对胚胎的直接损害都对出生缺陷的发生具有重要作用。

到本世纪初，我国每年约有20 ~ 30万肉眼可见的先天畸形儿出生，加上出生数月后才显现出来的缺陷幼儿，先天残疾儿童高达80 ~ 120万人，约占每年出生人口总数的4% ~ 6%。我国每年因神经管畸形造成的直接经济损失超过2亿元，先天愚型的治疗费超过20亿元，先天性心脏病的治疗费高达120亿元³⁵。出生缺陷不但引起死亡，并且导致大部分存活的出生缺陷儿童落下残疾，给家庭造成的心理负担和精神痛苦是无法用金钱衡量的。

表 2-5 山西省 1978 ~ 1980 年主要城市工业区与邻近县胎儿出生缺陷率比较³²

城市	胎儿出生缺陷率（‰）		
	工业区与受污染郊区	居民区	相邻县区
太原市	39.72	23.02	4.15
大同市	26.53	11.20	17.54
长治市	48.89	33.12	15.31
阳泉市	42.11	27.44	17.10



新生儿缺陷 © 卢广

5.2.5 地方病

地方病是指由于自然或人为原因，在局限区域内造成地球的某种化学物质含量变化所引起的特异性疾病，如地方性氟中毒、砷中毒等。燃煤方式不当引起的地方病主要是地方性氟中毒和地方性砷中毒，分别是由燃煤过程中排放的氟、砷元素污染粮食和室内空气所引起的。在室内条件下，进行有害化学元素氟和砷致病机制的研究，为预防地方性燃煤氟中毒和砷中毒提供了有益的参考。

5.2.5.1 燃煤地方性氟中毒

燃煤型氟中毒是我国 20 世纪 70 年代后才确认的一种新的地方性氟中毒类型，主要分布在陕西、四川、湖北、贵州、云南、湖南和江西等地区。到 2007 年我国燃煤污染型氟中毒有病区县 178 个，病区村有 4.1 万个，累及人口 3446.4 万人³⁶。

由于当地居民使用敞灶燃煤，并用高氟煤做饭、取暖、烘烤粮食，导致长期吸入污染的空气和摄入氟污染的食品引起氟中毒，以氟骨症和氟斑牙为主要病理特征，儿童期暴露可发生氟斑牙和氟骨病，成年期暴露只发生氟骨病。

氟骨症：氟进入机体后，与骨组织中的钙形成难溶性的氟化钙（CaF₂），沉积于骨、软骨、关节面、韧带和肌腱附着点等部位，造成沉积部位的硬化。过量的氟还会消耗大量血钙，使骨中的钙不断释放进入血液，造成骨质疏松及骨软化甚至骨骼变形。氟骨症患者呈全身持续性酸痛，重者呈刺痛或者刀割样疼痛，伴有神经功能的异常，如麻木、肌肉松弛、握物无力等，常并发骨和关节结构的改变等。

氟斑牙：过量的氟进入体内，可形成大量的氟化钙沉积于正在发育的牙组织中，致使牙釉质不能形成正常的棱晶结构。患者牙齿釉面失去光泽，可见斑点，牙齿变黄变黑，并出现牙齿釉面缺损。

5.2.5.2 地方性砷中毒

我国燃煤地方性砷中毒病区主要分布于云南、贵州、四川、重庆、湖南、湖北、陕西等省。到 2007 年共有 12 个病区县，1657 个行政村，病区村人口总数 121.9 万，患病人数约为 1.6 万人³⁷。

燃用高砷煤是引起砷中毒及皮肤病变的主要原因，但关于地方性砷中毒的机制尚未完全阐明。现有的研究大多集中在砷对机体酶活性的抑制、相关代谢酶的多态性、DNA 损伤修复和甲基化、诱导氧化应激、导致细胞凋亡等方面。进入机体的砷可与酶蛋白分子结合成比较稳定的化合物，抑制酶的活性。砷对皮肤中酪氨酸酶的作用呈双相反应，小剂量的砷可以使其活性增强，使皮肤产生大量的黑色素；随着砷蓄积量的增加，黑色素细胞逐渐失去正常功能，黑色素合成减少甚至完全消失，皮肤转为色素脱失，出现白色斑点。砷的致癌机制尚不完全清楚，目前关于砷的致癌机制可以归纳为：DNA 损伤、基因表达异常、DNA 的甲基化以及砷的氧化应激活性等。

砷中毒患者的皮肤病变表现为皮肤色素代谢异常，色素沉着与色素缺失同时出现在躯干部位，可发生手掌和脚跖部皮肤角化、肢端缺血坏死、皮肤癌变等，危害极其严重。目前国家在主要病区禁采高砷煤、推广改良排风炉灶，这些措施可有效地降低病区人群的砷暴露水平。



2010 年 6 月，内蒙古赤峰市内，毗邻赤峰热电厂一幼儿园。© 赵钢 / 绿色和平

5.2.6 非特异性影响

环境有害因素对人体健康的作用特点是低浓度、长时间、反复作用于机体。虽然某些暴露人群可能会出现特异性的靶器官损害，引起相应疾病，但是大部分暴露人群所遭受的健康危害并不以某种典型的临床表现方式出现，而是体现为机体的生理功能、免疫功能以及对环境有害因素的抵抗力减弱，对生物感染的敏感性增加，健康状况逐步下降等现象。环境污染的群体健康效应则表现为死亡率、发病率等健康指标的改变。

5.2.6.1 大气污染引起人群总死亡率的升高

许多研究表明，人群死亡率的升高与大气污染相关。其实不难理解，如果人群长期暴露在污染的大气中，机体就会受到各种污染物的危害，出现一系列的异常状况，如身体负荷增加、生理反应和生化代谢异常等，最终就会导致人群发（患）病率的升高、死亡率的增加。

1992 年在辽宁省沈阳市进行的关于大气污染对人群死亡率影响的研究³⁸表明，燃煤大气污染会提高人群的总

死亡率。表 2-6 中，调查人员按总悬浮颗粒物（TSP）与二氧化硫（SO₂）的浓度不同将沈阳市分为低度、中度和高度三个污染区。调查结果显示，重污染区与中污染区的人群总死亡率分别为轻污染区的总死亡率的 1.2 倍和 1.1 倍。

5.2.6.2 大气污染降低儿童免疫力

关于大气污染和人群免疫力的研究主要集中在儿童这一特殊群体上。2001 年在辽宁省沈阳市和本溪市进行的关于大气污染对儿童免疫力影响的研究³⁹表明，大气污染可降低儿童的血清免疫球蛋白（Ig）的水平。数据显示，两城市污染区儿童的 IgM 和 IgA 的水平均低于对照区儿童；两市环保局监测数据表明本溪市的污染程度要重于沈阳市的同时，本溪市污染区儿童的 IgM 和 IgA 水平也低于沈阳市儿童，表明大气污染程度越重，儿童的免疫水平下降越明显。

① 外源化学污染物与人体 DNA 的一种化学结合方式，可影响 DNA 的正常生理功能和生物体遗传物质的稳定性。
② 一种机体对外源化学物的代谢反应，目前认为，这是外源化学物损害机体健康和人体衰老的机理之一。

① 机体免疫系统分泌的一类可对抗外源有害物质，保护机体健康的球形蛋白质，根据分子结构分，血清中的免疫球蛋白有 IgG、IgA、IgM、IgE 等几种类型，均是反映机体体液免疫状况的指标。

5.2.6.3 燃煤大气污染会影响儿童的神经系统发育——重庆市铜梁案例分析

重庆市铜梁县，人口 81 万，坐落于直径约为 3 公里的盆地内。铜梁县发电厂位于县中心的南部，每年的旱季（即 12 月 1 日至次年的 5 月 31 日）开机供电，以弥补旱季水力发电的不足。该发电厂没有配备现代化的燃煤污染物减排技术，每年 6 个月的开机供电期燃煤量为 25000 吨左右。除了电厂以外当地几乎没有别的大气污染源，所有家庭都采用天然气进行取暖和做饭，且机动车辆数量有限。当地空气监测结果显示，发电厂运行期间，大气中多环芳烃类（PAHs）物质的含量比平时高 3.5 倍。2004 年 5 月铜梁电厂关闭，随后大气中的多环芳烃类物质的含量明显下降。

在铜梁电厂关闭前后，中美两国的研究者进行了一项关于

产前燃煤污染物暴露与婴儿神经系统发育关系的研究⁴⁰。将 2002 年出生的婴儿列为产前暴露组婴儿，与 2005 年出生的无产前暴露组婴儿进行对比，分别测定两组婴儿的脐带血 PAH-DNA 加合物，并在婴儿 2 周岁时，使用格塞尔婴幼儿发展量表（GDS 表）评价婴儿的神经系统发育情况。结果显示，2002 年进入研究队列儿童的各项神经指标发育的迟缓率均高于 2005 年进入研究队列的儿童，其中尤以动作能和应人能差异显著，2002 年队列儿童的动作能与应人能指标的发育迟缓率分别为 2005 年队列儿童的 2.89 倍和 3.25 倍。提示产前暴露燃煤污染物会对婴幼儿的神经系统发育产生不良影响。（表 2-7）

此外，燃煤大气污染还可以引起多种非特异性反应，如大气污染物可以直接或间接引起机体过敏反应、加剧哮喘症状、加剧变应性鼻炎的症状等。

表 2-6 1992 年沈阳市三个污染区死亡率结果比较

污染区	人口	大气污染		死亡率（1/10 万）			RR 值
		TSP	SO ₂	例数	粗率	调整率**	
低污染区	918185	353	75	4342	472.89	578.63	1.0
中污染区	1523442	497	116	9021	592.15	625.13	1.1
高污染区	655726	560	212	4350	663.39	691.98	1.2

表 2-7 两队列儿童神经系统发育迟缓率比较

GDS 评分	神经发育迟缓率（%）	
	2002 队列	2005 队列
动作能	13.6	4.7
应物能	12.7	10.3
言语能	10.0	10.3
应人能	9.1	2.8
综合评分	6.4	1.9

注：总悬浮颗粒物（TSP）与二氧化硫（SO₂）单位是 μg/m³；** 以世界人口年龄调整。

RR 值即相对为危险度，是反映污染物健康危害程度和风险大小的统计学指标。

①多环芳烃（PAH）与 DNA 分子反应形成的一种的产物，是一个用来观察多环芳烃致癌风险的生物学指标。

②格塞尔量表由美国心理学家 A. 格塞尔制定的婴幼儿发展测量工具。最初发表于 1925 年，后经几次修订。1974 年修订版的测试对象为从出生至 5 岁的婴幼儿。测试内容分为：1. 动作能：测试幼儿坐、步行和跳跃的能力。2. 应物能：测试幼儿看物、摘物和绘画等能力。3. 言语能：测试幼儿听、理解和言语能力。4. 应人能：测试幼儿对周围人的应答能力。结果以发展商数评价幼儿的发展水平。通常发展商数 > 84 为正常，≤ 84 为发育迟缓。格塞尔认为，所观察到的发展现象反映了中枢神经系统的成熟程序。这一理论受到各方面的肯定。

格塞尔量表可用于临床诊断，它不仅适用于测量幼儿的发展水平，而且还适用于伤残儿，被认为是婴幼儿智能测试的经典方法。20 世纪 60 年代初，中国开始在临床上试用格塞尔量表。

5.3 间接健康危害

燃煤大气污染对人体健康影响除直接的急、慢性危害外，还有间接健康影响。此类健康影响不是由燃煤污染物直接引起的，而是由与燃煤相关的环境问题，如气候变化、酸雨等通过危害生态环境所间接引起的人群健康危害效应。

5.3.1 气候变化

影响气候变化的温室气体有多种。CO₂ 作为影响气候变化的重要因子，与煤炭的大量使用密不可分。

气候变化对人体健康的影响还是一个新兴课题。目前研究提示：

气候变化有利于病原体及有关生物的繁殖，引起借助自然生物传播的传染病的分布区域发生变化，扩大其流行的程度、时间和范围，从而加重对人群健康的危害；

气候变化会使空气中的一些有害物质，如真菌孢子、花粉的浓度增高，导致人群中过敏性疾病的患病率增加。

气候变化带来降水量的改变，导致洪水、干旱、暴雨等极端天气的出现频率增加，由此造成的人群发病率和死亡率的增加。从今年年初新疆地区暴雪、西南五省大旱到入夏后的大范围暴雨、洪涝灾害，甘肃舟曲县的泥石流等极端天气引发的各种灾害在我国频繁出现，造成的人员伤亡和经济损失巨大。

截至 2010 年 7 月 15 日 9 时，暴雨导致全国 26 省区市因灾死亡 594 人，失踪 212 人，9750 万人受灾，倒塌房屋 59 万间，直接经济损失约 1202 亿元人民币⁴¹。

截至 2010 年 8 月 15 日 16 时，因强降雨引发的甘肃舟曲县特大泥石流灾害的死亡人数已达 1248 人，失踪 496 人，66 人受伤住院⁴²。

5.3.2 酸雨

当降水的 pH 值小于 5.6 时称为酸雨，我国酸雨主要是硫酸型酸雨。我国酸雨的形成虽受很多因素的影响，但是与燃煤排放的二氧化硫密不可分。

2009 年环保部发布的《中国环境状况公报》显示酸雨发生面积约 120 万平方千米，重酸雨发生面积约 6 万平方千米。2010 年上半年全国环境质量状况显示，酸雨污染仍然较重。监测的 443 个城市中，189 个城市出现酸雨。上海南汇区、浙江省台州市和温州市、福建厦门市等 8 个城市（区）酸雨频率为 100.0%。浙江、江西、湖南、福建、上海的大部分地区，广东中部、广西北部、贵州东北部，四川东部、重庆南部、湖北西部、安徽南部等地区酸雨分布集中⁴³。

酸雨对人群的健康危害，主要是通过生态环境的破坏间接引起的。酸雨影响生物多样性；增加土壤中有害重金属的溶解度，使其加速向水体动植物或农作物中转移，最后经食物链传递到人体内，引起人群健康危害。

5.3.3 臭氧层破坏

臭氧层是指大气层上空以臭氧分子为主要组分的大气层，可吸收短波紫外线和宇宙射线，对地球上的生物有保护作用。燃煤排放物中的某些物质（例如氮氧化物等）可以与臭氧发生反应，导致臭氧损耗。当臭氧层被破坏变薄、形成空洞以后，减少了臭氧层对短波紫外线和其他宇宙射线的吸收和阻挡功能，可造成人群皮肤癌和白内障等发病率增加，对地球上的其他动植物也有杀伤作用。



地球的生物多样性 © 绿色和平



5.3.4 影响生物多样性

生物多样性是人类生存的根本，可以说没有生物多样性人类无法独立存在。美国曾经花费近 2 亿美元和 9 年时间，在亚利桑那州人工建造了一个占地 13000 平方米的模拟地球生态环境的全封闭实验场——“生物圈 2 号”。它是个有海洋、平原、沼泽、雨林、沙漠、农业区和人类居住区的小生态系统。1993 年 1 月，8 名科学家入住“生物圈 2 号”，计划在内部生活两年。然而，一年以后，“生物圈 2 号”的生态状况急转直下，氧气含量从 21% 下降到 14%，二氧化碳和二氧化氮含量直线上升，大气和海水变酸，很多物种死去，而用来吸收二氧化碳的牵牛花却疯长。大部分脊椎动物死亡，所有传粉昆虫的死亡造成靠花粉传播繁殖的植物也全部死亡。其空气质量的恶化直接危及健康，科学家们被迫提前撤出，实验宣告失败。

这一结果使人类认识到，人类的生存高度依赖现有的生物多样性环境，但人类对自然环境生态系统的认识还存在很多未知领域，也无法创造出适合生存的环境条件。对环境的污染会严重地影响生物多样性环境，破坏人类生存的基础，威胁人类生存的条件。

燃煤大气污染的间接健康危害，除了气候变化、酸雨、破坏臭氧层和生物多样性之外还有很多，如燃煤大气污染能降低大气能见度，使交通事故发生的频率增加等。这些间接危害虽然不能直接致病，但是对人类潜在的健康威胁和给国家造成的经济损失却不容忽视。更为重要的是，像气候变化、生物多样性等问题都是全球性的生态问题，更应当引起全世界的重视。

第三部分 大气污染所致健康损失的分析



2007 年 1 月 25 日，山西临汾，骑自行车上下班往返的人们戴着口罩，以避免空气污染。
© Natalie Behring/ 绿色和平



大气污染的危害主要表现为对人体健康的影响，其次是对动植物生长的危害以及对环境资源的破坏。将大气污染的危害进行经济学评价后可概括为生产损失、固定资产损失、人群健康损失和环境质量损失。近些年来，虽然机动车的数量一直增加，石油废气污染在大气污染中的比例有所上升，但是中国大气污染仍以燃煤型污染为主。因此通过对大气污染的健康经济损失的评价可间接反映煤炭燃烧所造成的健康经济损失。

健康经济损失是大气污染造成的最主要的经济损失之一，主要包括三个方面⁴⁴：

直接经济损失，指社会为防治疾病消耗的卫生资源，如就医费用、营养费、交通费、误工陪护费等，可采用疾病成本法⁴⁵计算；

间接经济损失，指因疾病损失的劳动时间或降低的劳动能力所引起的社会和家庭的目前价值和将来价值的损失，可采用支付意愿法⁴⁶或人力资本法来计算；

生命质量的损失，指因各种疾病或者残疾造成的健康寿命损失，通常是由早死造成的损失和因伤残造成的健康损失二者结合起来加以测算，可以采用相应的指标（如伤残调整寿命年⁴⁷等）来评价损失。

中国 2003 年由于空气污染引发的过早死亡和疾病的经济损失为 1573 亿元，占到当年 GDP 的 1.16%。2005 年，燃煤导致的健康经济损失为 44.8 元/吨，占到煤炭燃烧环境成本的 49%。2007 年，煤炭的外部成本高达 17450 亿元，相当于当年 GDP 的 7.1%。

近年来有许多关于城市大气污染导致的健康经济损失研究，结果显示大气污染导致的各省市健康经济损失相当严重。以北京为例，北京 2000 ~ 2004 年可吸入颗粒物（PM₁₀）的年平均浓度为 141 ~ 166 μg/m³（国家环境空气质量的二级标准的 PM₁₀ 年均浓度限值为 100 μg/m³），5 年期间健康经济损失每年在 167 000 万 ~ 365 500 万美元，占北京年国民生产总值的 6.55%⁴⁵。类似的其他主要研究结果如表 3-1 所示，2000 年兰州市的大气污染的健康经济损失为 4.29 亿元，其占大气污染总经济损失的 38.51%；1997 年，江苏省的健康经济损失为 94.29 亿元，占大气污染总经济损失的 72.53%。

虽然中国各城市人群中由于空气污染造成的健康经济损失在总经济损失中所占比重各不相同，但是我们依然可以看出，大气污染引起的健康经济损失相当严重。这些数据不仅是量化的经济指标，也反映大气污染对社会经济发展的负效益和环境保护工作的负效益。

表 3-1 中国部分城市与大气污染有关的经济损失⁴⁶

地点	时间	总经济损失（亿）	健康经济损失（亿）	健康经济损失比例（%）	煤占能源比例（%）
青岛市	1998		3.53		53.9
兰州市	2000	11.14	4.29	38.51	80.0
衡水市	2000	1.23	1.21	97.89	
连云港市	2000	3.37	0.22	6.38	
抚顺市	2000		1.48		
西安市	2002	5.64	2.52	44.57	52.0
浙江省	1996	34.85	12.70	36.44	57.6
福建省	1996		11.12		29.7
江苏省	1997	100 ~ 130	94.29	72.53	28.3
山西省	1999		28.89		94.0
山东省	2002	200.17	109.51	54.71	80.0

⁴⁴ 通过计算治疗疾病花费的费用来评估人体健康经济损失的方法。疾病成本包括患者患病期间支付的与患病有关的直接费用和间接费用，如门诊、急诊、住院的直接费用和药费，因病休息引起的收入损失以及交通和陪护费用等。

⁴⁵ 环境经济评价研究方法之一，是通过调查人对某种物品（比如更好的空气和水等）愿意付出的最大的金额，借以衡量这种物品带来的效用变化。

⁴⁶ 一种测算环境污染人体健康损失的研究方法，指用收入的损失去估价由于污染所致的人口过早退休和死亡的成本。适用于群体健康损失研究。

⁴⁷ 一个定量计算因各种疾病造成的早死与残疾对健康寿命年损失的综合指标。指从发病到死亡所损失的全部健康寿命年，包括因早死所致寿命损失年（YLL）和疾病所致伤残健康寿命损失年（YLD）两部分。

第四部分 政策建议



2007 年 1 月 25 日，山西临汾，一位骑车上班的代口罩女子。© Natalia Behring/绿色和平





1. 现行政策

减少燃煤大气污染对公众健康影响的关键在于从源头上治理并减少大气污染物的排放。在这个方面，中国政府已采取了多项政策措施，其中最重要的《中华人民共和国大气污染防治法》于2000年4月经全国人大修订通过，至今已实施10年，在防治大气污染方面起了重要的作用。

从2009年开始，对于《大气污染防治法》的进一步修订进入到了全国人大的议程。从目前的讨论来看，我国大气污染防治工作已从浓度控制转向总量控制，从单一的二氧化硫控制过渡到同时包括氮氧化物、颗粒物、挥发性有机物等多种污染物的综合控制。此外，2010年6月，环保部等九大部门联合出台了《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》，更推动了大气污染治理向区域性、多部门联合行动的方向发展。

同时，针对排放大户火电行业，国家环保部也正在修订《火电厂大气污染物排放标准》，对新建火电厂设备规定具体的排放指标，使我国火电厂设备技术水平的相关排放指标达到国际上的先进水平。

正在讨论中的十二五规划，也有望对重点区域内火电厂提出氮氧化物减排工作的明确要求。

在积极治理大气污染物的同时，中国政府也逐步制定和完善大气环境卫生标准，以保障人体健康和生态环境为目标，规定大气环境中某些主要污染物的最高允许浓度。目前最常用的是《环境空气质量标准》（GB3095-1996）。

为了更好地将环境科学和医学健康有效地结合，控制有害环境因素及其健康影响，减少环境相关性疾病发生，国家卫生部与环境保护总局（现环境保护部）等部门在2007年联合启动了“国家环境与健康行动计划2007～2015”，其目标为：

2007～2010年：全面建立环境与健康工作协作机制，制定促进环境与健康工作协调开展的相关制度和环境污染健康危害风险评估制度；完成对现有环境与健康相关法律法规及标准的综合评估，提出法律法规及标准体系建设的需求；完成国家环境与健康现状调查及对环境与健康监测网络实施方案的研究论证；加强环境污染与健康安全评估科学研究。

2010～2015年：开展环境与健康相关法律法规的研究、

制定和修订工作，完善环境与健康标准体系；充实环境与健康管理队伍和实验室技术能力，基本建成环境与健康监测网络和信息共享系统，有效实现环境因素与健康影响监测的整合以及监测信息共享；完善环境与健康风险评估和风险预测、预警工作，实现环境污染突发公共事件的多部门协同应急处置；基本实现社会各方面参与环境与健康工作的良好局面。

2. 政策建议

为进一步防治燃煤大气污染对公众健康的影响，还需做好以下几方面的工作：

1. 对大气污染与健康相关研究进行顶层设计和整体性规划，统领我国大气污染健康影响研究和风险防范工作。

2. 积极推动我国大气污染监测和人群健康监测网络的融合。增加大气污染物的常规监测指标（例如：氮氧化物、细颗粒物、重金属物质等），建立起国家大气污染人群健康监测体系和健康风险预警、预测体系，有效实现环境因素与健康影响监测的整合以及监测信息共享。

3. 完善大气环境污染对人群健康影响的基础性研究，尤其是人体健康损伤的生物监测指标、监测方法，大气污染物的健康损伤机理和大气污染人群健康经济损失等方面的研究。

4. 加大对人群健康、空气质量、排放控制等信息的公布力度，努力做到政府与普通公众对环境与健康数据的共享共知。做好环境与健康的教育工作，使更多的人参与到环境保护中来。

5. 关注农村大气环境污染问题，严控污染下乡，污染转移。

除了加强大气环境卫生工作，我们也要反思，对煤炭的过度依赖在保障经济高速增长的同时，也使环境破坏问题日益凸现，由此带来的健康危害和隐患令人担忧，成为社会发展中不可回避的沉重负担。随着中国大、中型城市能源结构的转换，大气污染源的变化，燃煤大气污染对环境和人群健康的危害问题将会变得更为隐蔽，更易被忽略。当前，我国能源需求仍在快速增长，若不能尽快扭转高度依赖煤炭等化石能源的能源消费结构、大幅度提高能源利用效率，燃煤造成的系列环境污染、健康危害等问题就无法从根本上得到解决。我国正处在发展方式转型的十字路口，优化能源结构才能使我国摆脱环境问题随经济增长不断升级的困境，迈向低碳的可持续发展的道路刻不容缓。

参考文献

[1] 数据来自中央人民政府网，详见 http://www.gov.cn/gzdt/2010-02/25/content_1541240.htm

[2] 数据来自BP公司2010年发布的BP Statistical Review of World Energy, 详见 http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2010_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2010.pdf

[3] 数据来自发改委能源局网站，详见 http://nyj.ndrc.gov.cn/ggtz/t20100713_360613.htm

[4] 茅于軾，盛洪，杨富强，等.《煤炭的真实成本》第1版，煤炭工业出版社，北京，2008年10月，p2.

[5] 张世秋，王奇.《环境保护技术政策与污染物控制对策》第1版，中国环境科学出版社，北京，2008年12月，p.308.

[6] 数据来自环境保护部，详见 http://www.mep.gov.cn/zhxx/hjyw/200904/t20090423_150766.htm

[7] 数据来自环境保护部，详见 http://zls.mep.gov.cn/hjij/nb/2008tjnb/201004/t20100421_188500.htm，http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkqb/2009hjzkqb/201006/t20100603_190429.htm

[8] 茅于軾，盛洪，杨富强，等.《煤炭的真实成本》第1版，煤炭工业出版社，北京，2008年10月，p53.

[9] 茅于軾，盛洪，杨富强，等.《煤炭的真实成本》第1版，煤炭工业出版社，北京，2008年10月，p13.

[10] Jennifer Holdaway, 王五一，叶敬忠，等.《环境与健康：跨学科视角》第1版，社会科学文献出版社，北京，2010年5月，p30.

[11] 摘自环境保护部《国家污染物环境健康风险名录》第1版，中国环境科学出版社，2009年2月.

[12] Jennifer Holdaway, 王五一，叶敬忠，等.《环境与健康：跨学科视角》第1版，社会科学文献出版社，北京，2010年5月，p59.

[13] 陈竺.《全国第三次死因回顾抽样调查报告》第1版，中国协和医科大学出版社，北京，2008年10月，p.14.

[14] 杜一娇，金雪龙.煤烟型大气污染对呼吸系统症状和疾病发生的影响.中国健康教育，2004，20（6）：543—544.

[15] 王贤珍，张允忠.北方城市空气污染对居民健康影响的研究[J].中国公共卫生，1992，8（5）：197—198.

[16] 林刚，都英杰，田村宪治，等.抚顺城区大气悬浮颗粒物污染与呼吸系统疾病死亡率相关性的定量分析[J].生态毒理学报，2007，2（3）：280—283.

[17] 魏复盛，胡伟.中国四城市空气污染及其对儿童呼吸健康影响的分析[J].世界科技研究与发展，2000，22（3）：9—12.

[18] 胡伟，魏复盛，Zhang Jim.室内燃煤与大气污染对儿童肺功能的交互影响[J].环境与健康杂志，2004，21（5）：275—278.

[19] 杨克敏，衡正昌.《环境卫生学》第6版，人民卫生出版社，北京，2007年6月，p.87.

[20] 卫生部心血管病防治研究中心，《中国心血管病报告2007》，中国大百科全书出版社，2009年4月，p2.

[21] 任艳军.大气颗粒物污染与心血管疾病死亡的病例交叉研究(硕士论文).浙江大学.2006.

[22] 徐肇翊，刘允清，俞大乾，等.沈阳市大气污染对死亡率的影响[J].中国公共卫生学报，1996,15（1）：61—64.

[23] 井立滨，秦怡，徐肇翊，等.本溪市大气污染与死亡率的关系[J].中国公共卫生，

1999，15（3）：211—212.

[24] 王慧文，林刚，潘秀丹.沈阳市大气悬浮颗粒物与心血管疾病死亡率[J].环境与健康杂志，2003,20（1）：13—15.

[25] 张晓平，张燕萍，封宝琴，等.大气污染对心脑血管疾病死亡（65岁以上）的急性影响——高暴露环境研究结果.2006年第四届环境与职业医学国际学术研讨会论文集，229—232.

[26] 陈竺.《全国第三次死因回顾抽样调查报告》第1版，中国协和医科大学出版社，北京，2008年10月，p.14.

[27] 陈竺.《全国第三次死因回顾抽样调查报告》第1版，中国协和医科大学出版社，北京，2008年10月，p.23.

[28] 何兴舟，杨儒道.《室内燃煤空气污染与肺癌》第1版，云南科技出版社，云南，1994年8月，p.11.

[29] 赵秀艳，游昭华，史习舜，等.出生缺陷的研究进展[J].海峡预防医学志，2006,12(2):232—226.

[30] 冯小微，朴军，肖平，等.本溪市出生缺陷儿与大气污染及其他环境因素关系的研究[J].中华儿童保健杂志，1997，5（4）：278—281.

[31] 唐逸文.煤炭山西：出生缺陷的世界顶峰，《北京科技报》，2007年12月17日.

[32] 杨克敏，衡正昌.《环境卫生学》第6版，人民卫生出版社，北京，2007年6月，p.49.

[33] 冯小微，朴军，肖平，等.本溪市出生缺陷儿与大气污染及其他环境因素关系的研究[J].中华儿童保健杂志，1997，5（4）：278—281.

[34] 李达圣，安冬，梁音，等.贵州省燃煤型砷中毒病区先天畸形调查[J].中国地方病学杂志，2005，24，（2）：176—178.

[35] 卫生部、中国残联关于印发的《中国提高出生人口素质、减少出生缺陷和残疾行动计划(2002～2010)》[J].中国妇幼保健，2002,17（11）：648—651.

[36] 数据来自2008年中国环境状况公报，详见 http://www.mep.gov.cn/pv_obj_cache/pv_obj_id_54828AE0CEF5CD19A9A18A8F0DF86F288CB41000/filename/P020090609397520028674.pdf.

[37] 数据来自2008年中国环境状况公报，详见 http://www.mep.gov.cn/pv_obj_cache/pv_obj_id_54828AE0CEF5CD19A9A18A8F0DF86F288CB41000/filename/P020090609397520028674.pdf.

[38] 徐肇翊，刘允清，俞大乾，等.沈阳市大气污染对死亡率的影响[J].中国公共卫生学报，1996,15（1）：61—64.

[39] 叶丽杰，王雨，孙文娟.辽宁省二城市大气污染与儿童免疫球蛋白水平研究[J].环境与健康杂志，2002,19（1）：67—68.

[40] Frederica Perera, Tin-yu Li, Zhi-jun Zhou, et al. Benefits of Reducing Prenatal Exposure to Coal-Burning Pollutants to Children's Neurodevelopment in China[J]. Environmental Health Perspectives,2008,116(10):1396—1400.

[41] 数据来自中国新闻网，详见 <http://www.chinanews.com.cn/gn/2010/07-15/2404067.shtml>.

[42] 北京青年报，2010年8月16日，第一版。

[43] 数据来自环境保护部，详见 http://www.gov.cn/gzdt/2010-07/26/content_1664192.htm.

[44] 张文丽，马文军，潘小川，等.煤炭健康损失成本研究进展[J].卫生研究，2008，37（6）：763—755.

[45] ZHANG M, SONG Y, CAI X.A health -based assessment of particulate air pollution in urban areas of Beijing in 2000—2004[J].Sci Total Environ., 2007，376(1—3): 100—108.

[46] 张文丽，马文军，潘小川，等.煤炭健康损失成本研究进展[J].卫生研究，2008，37（6）：763—755.

 100%再生纸印刷

GREENPEACE 绿色和平

地 址：北京市东城区新中街68号聚龙花园7号楼聚龙商务楼3层

邮 编：100027

电 话：+ 86 10 6554 6931

传 真：+ 86 10 6554 6932

www.greenpeace.cn