

研究说明

目录

源排放清单.....	1
健康影响评估.....	6
参考文献	8

源排放清单

为了评估燃煤火电厂排放的污染物对人体健康的影响，我们首先需要获取必要的信息，例如排放了多少污染物以及污染排放的地点等。本项目为此建立了大约 2000 个煤电厂基本信息的数据库。由于中国的政府和公司并不像欧洲和美国那样公开报告每个电厂的排放数据，我们对电厂排放数据的估计只能基于国家总排放量、已报告的大型装机设备的排放速率、可获得的特定电厂的信息、以及国家对电厂排放的相关要求和规定。这样得到的评估结果在国家 and 公司层面是可靠的，所估计的排放数据在一定程度上也是准确的，但在估算单个电厂排放时会有一些不确定性。

这里估计了 2011 年正在运转的电厂的排放量。电厂的正常运转参数数据来源于中国电力企业联合会 2012 年年鉴。这份年鉴中给出了电厂的装机容量、运转小时数、以及热效率。这些数据也可被用来作为同等规模电厂的参考值，以弥补参数不完整的电厂。

装机量大于 (百万瓦)	热效率(低热 值)	运转时数(小 时/年)
0	28.4%	3761
20	30.2%	3793
50	31.4%	4302
100	33.3%	5055
300	35.2%	4644
500	36.8%	5322
1,000	38.2%	5537
2,000	39.4%	5928

表 1. 给缺少数据的电厂使用的平均运转参数

电厂类型	热效率 (低热 值)
亚临界	39.0%
超临界	42.0%
超超临界	44.0%
在建，蒸汽性能未知	41.4%
已规划，蒸汽性能未知	41.8%

表 2. 估计的新电厂的热效率。根据普氏能源资讯的数据库和世界资源研究所的全球煤炭风险评估报告。

电厂的地理位置由绿色和平组织在地图上标注，精确到区、县级别，如果可能的话，可给出准确的坐标。电厂的归属权信息则来自于普氏能源资讯的国际电厂数据库。

安装在电厂内的污染控制设备的信息来自于环境保护部，环境保护部拥有所有已安装脱硫和脱硝设备的电厂列表。这个数据也包含电厂的运转年份，这有助于针对电厂的每一个部门设定排放限值。然而，中国电力企业联合会和环境保护部的电厂列表数据并不完全匹配，对数据冲突的电厂，渗透率和电厂规模取两个数据集的平均值。

电厂效率则基于国际电厂数据库中的蒸汽状态（亚临界、超临界或超超临界）。假定所有 2011 年以后投产的、和仍在建设中的电厂，都安装了脱硫和脱硝设备，并且符合新的 2011 年排放标准。这是一个保守的假设，主要是考虑到现有的电厂仍然没达到 2003 年的旧标准。

煤炭质量的数据，即煤烟量和汞含量，来自美国地质调查局的世界煤炭质量清单。首先，所有电煤样本的平均价格是从每个省的数据库中计算出来的。然后，煤炭交易的平均价格是由每个省的煤炭出口价格加权平均得来。最后，每个省燃煤的平均价格是由该省的本地煤价与进口煤价用交

易百分比加权平均来计算得来。计算产生单位热能带来的煤烟量(Nm³/GJ)时，先把数据库中给的热容量从高热值(HHV)转换成低热值(LHV)，使用世界煤炭协会提供的经验公式(2007):

$$LHV = HHV - 0.212H - 0.0245M - 0.0008O,$$

其中 LHV 和 HHV 的单位是 MJ/kg; M 是含水百分比, H 是含氢百分比, O 是含氧百分比(来源于基底位元素分析)。每千克燃料的煤烟量是在欧洲标准 EN 12952-12 的经验公式基础上计算得到的。

省份	煤烟体积 ¹ (Nm ³ /GJ)	汞含量 (mg/GJ)
安徽	344.9	7.8
北京	356.6	7.4
重庆	349.5	4.9
福建	359.4	3.8
甘肃	348.5	2.2
广东	354.5	3.5
广西	354.4	5.1
贵州	347.8	9.1
河北	350.9	4.5
黑龙江	345.1	2.9
河南	347.6	7.9
湖北	354.5	3.9
湖南	353.2	5.2
内蒙古	345.8	10.5
江苏	353.6	4.6
江西	352.1	7.9
吉林	346.3	4.2
辽宁	349.9	6.1
宁夏	348.2	11.8
青海	348.6	2.8
陕西	342.4	7.5
山东	350.3	4.4
山西	347.3	6.4
四川	348.4	4.0
新疆	347.1	1.4
云南	345.6	5.7

表 3. 以平均值估算的各省燃煤排放的污染物参数。

在这些数据的基础上，假定所有电厂均达到国家排放标准，我们可以得到各电厂的空气污染排放总量。然后，调整排放速率使得所有电厂和每家公司的发电厂的总排放量与报告中的总量相符。

¹On dry, normal temperature and pressure and 6% O₂ basis, in line with the Chinese emission standards.

电力部门的酸性气体和颗粒物排放总量数据取自中国环境统计年鉴（2012 年）（国家统计局 2013）。大型电力公司的排放信息摘自其企业社会责任报告。同时也要确保电厂的总排放量在每个省的总排放量报告中占一个合理的比例。

电厂竣工时间	烟囱排放物浓度上限		
	SO ₂	NO _x	TSP
2004 年及以后	400	450	50
2004 年之前	400	650	50
1997 年之前	1200	1100	200
2012 年及以后	100	100	30
关键地区的新电厂	50	100	20

表 4. 2011 年（及以后）用于规范电厂的烟囱排放物浓度上限

电厂竣工时间	mg/Nm ³	
	SO ₂	TSP
2004 年及以后	1200	100
2004 年之前	1200	100
1997 年之前	1200	200

表 5. 对一些省份燃烧低硫煤的电厂使用特殊的烟囱排放物浓度上限标准：重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广西、和内蒙古。

TSP 排放用美国 EPA AP-42 中的排放因子转换成初级 PM10 和 PM2.5 排放：

TSP to PM10 0.675
TSP to PM2.5 0.300

表 6. 不同颗粒物尺寸的比值

公司	排放率 (g/kWh)		
	SO ₂	NO _x	TSP
中国电力投资集团公司	2.36	3.23	0.3
华电	2.4	3.0	0.3
大唐国际发电集团	0.38	1.33	0.12
大唐集团	1.92	3.17	0.29
华能国际	0.57	1.55	N/R
华能集团	N/R	N/R	N/R

国电	2.14	N/R	N/R
华润电力	0.56	1.35	0.38
广东粤电	0.44	1.36	0.07
神华	0.21	0.87	0.1

表 7. 2011 年各企业社会责任报告中给出的空气污染排放速率（N/R=未报告）

汞排放是根据上图所示的煤炭平均汞含量、和 Wu (Wu et al. 2009) 指出的与不同污染控制有关的清除率来估算的。结果显示，汞排放比 Streets 等人 (2008) 对 2005 年的估计值低 20%，这符合电力行业中煤烟脱硫设备日益普及和煤炭消费增加的趋势。

ESP	29.4%
ESP+FGD	69.0%
洗煤	30.0%

表 8. 不同技术条件下的汞清除率（根据 Wu et al. 2009）

为了估计煤烟最初的上升高度，需要知道影响其扩散的烟囱参数（烟囱高度和直径，煤烟温度和速度）。除北京和上海的几个电厂汇编了实际的烟囱参数外，大多数电厂的信息还无从得知。Zhou 等 (2006) 认为，中国的电厂都是按照非常相似的工程标准建造的，大部分电厂都符合指导值。此外，他们的研究结果还表明在可行范围内，煤烟的健康影响对烟囱参数并不十分敏感。主要的烟囱参数的推荐值都取自 Lan 等人 (2011) 的研究，其中煤烟温度使用的是 Pregger& Friedrich (2009) 给出的欧洲典型值。

装机量 (百万瓦)	烟囱高度 (米)		煤烟温度 (摄氏度)	出口速度 (米/秒)	烟囱直径 (米)
	正常运转电厂	新电厂			
25	80	80	140	14	4
50	100	100	140	23	4
200	120	150	140	20	4
300	150	180	140	20	4
800	180	240	110	30	7
1,200	210	240	100	30	7
8,000	240	240	100	30	7

表 9. 模型中给缺参数的电厂使用的烟囱参数（建模常用值）。

直接建模来源的选取首先是把建模区域划分成 0.5x0.5° 的网格，选择每个单元格中的最大源——至少 1200 兆瓦发电能力的燃煤电厂。其他来源的选取是为了最大化直接建模总排放清单的份额，最大化空间覆盖面，最大化重点区域（京津冀，长江三角洲，和珠江三角洲）的覆盖面。直接建

模来源包括 50%的燃煤发电能力，43%的 2011 年二氧化硫排放估算量，以及分别 41%、40%、48% 的氮氧化物、TSP 和汞排放量。

健康影响评估

我们采用了“污染物浓度-健康响应”函数来估算由暴露于 PM2.5 导致的健康影响。该函数来自 WHO 全球疾病负担 2010 项目（Lim 等，2012）。该项目是目前最领先、最权威的针对中国和全球范围由 PM2.5 导致的早死研究，并且已发展出一套新的风险模型，强调了在高平均浓度下的可应用性。在该模型中高浓度水平下模型呈现平缓，是由于考虑到已发现的规律，即风险随着浓度的增加而提升在低浓度水平中提升更大。通过四项特别原因（中风，肺癌，缺血性心脏病(IHD)和慢性阻塞性肺病）导致的死亡率可以计算出总的死亡率。因这四种原因导致的死亡率占全国总死亡率的 45%。通过这种特别的原因提供了更好的从一个国家到另一个国家的类比方法。而早期的方法使用全部原因的致死率作为指示。使用这种方法可以将由火电厂燃煤释放的 PM2.5 导致的提早死亡进行深入分析。

如果由世界疾病负担 2010 项目的风险函数可以直接分析不同行业的影响，那么所有行业的影响总和可能会小于实际的影响总和。因此，基于报告作者(Burnett & Cohen, 2013)的推荐，按照已观察到的浓度范围，在 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的增长下的健康影响被用来进行分析计算。平均的风险比 RR_{avg} 可以用如下的死亡率进行计算。

$$RR_{avg} = \frac{\sum_{c=15\mu\text{g}/\text{m}^3}^{c_{avg}} \frac{RR(c)}{c - 15\mu\text{g}/\text{m}^3}}{c_{avg} - 15\mu\text{g}/\text{m}^3},$$

其中， $e RR(c)$ 是在浓度 c 的致死率与设想的无危害浓度的比值。 c_{avg} 是以人口加权的 PM2.5 浓度，此处为 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （世界疾病负担 2010 项目 Brauer 等（2012）估算的中国平均浓度为 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。求和项是以 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 开始，因为这代表风险模型中的着无危害浓度(5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)加上机选 RR_{avg} 时的浓度增长 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

评估 PM2.5 对健康的影响，这里采用了 Kan 等人（2005）推荐的“污染物浓度-健康响应”函数。Kan 开展的对非致死健康因子研究。这个响应函数比较保守，因为它使用了 PM10 的健康影响因子而不是暴露在 PM2.5 中的影响。后来根据世界卫生组织的建议，Kan 给出的函数又考虑了各种文件中记录到的针对婴儿死亡率、失业天数、和患病天数的影响。一个九国科学家共同参与的全新研究得到了关于 PM2.5 与低出生体重婴儿之间的风险联系的流行病学证据。不过总体死亡率是在各种原因死亡率的基础上估计出来的，具体原因是用来补充分析、深入研究个体死因的。

这些响应函数的应用需要中国人口的年龄结构和不同健康状况的基线发病率。除低出生体重个体的数据来自于世界银行外，其余数据取自官方统计资料，一些中国哮喘病研究的数据也被取用。

	污染物	年龄组	每增加 10 微克/立方米带来的患病风险	参考文献
慢性死亡（各种原因）	PM2.5	30-	4.3% (2.6%–6.1%)	Kan et al 2005
肺癌死亡	PM2.5	30-	8% (1%–16%)	Pope et al 2002
心肺疾病死亡	PM2.5	30-	6% (2%–10%)	Pope et al 2002
缺血性心脏病死亡	PM2.5	30-	12% (9%–16%)	Krewski et al 2009
婴儿死亡	PM10	1-12 月	4% (2%–7%)	Woodruff et al 1997 (in Hurley et al 2005)
低出生体重	PM2.5	新生儿	10% (3%–18%)	Dadvand et al 2013
哮喘病，儿童	PM10	0-15	6.95%	Kan et al 2005
哮喘病，成年人	PM10	16-	0.4% (0.0%–0.8%)	Kan et al 2005
慢性支气管炎	PM10	全年齡	4.6% (1.5%–7.7%)	Kan et al 2005
呼吸疾病住院	PM10	全年齡	1.3% (0.1%–2.5%)	Kan et al 2005
心血管疾病住院	PM10	全年齡	0.95% (0.6%–1.3%)	Kan et al 2005
内科门诊病人	PM10	全年齡	0.34% (0.19%–0.49%)	Kan et al 2005
儿科门诊病人	PM10	全年齡	0.39% (0.14%–0.64%)	Kan et al 2005
病假天数	PM2.5	15-64	4.6% (3.9%–5.3%)	Ostro 1987 (in Hurley et al 2005)
限制外出活动天数	PM2.5	18-64	4.8% (4.2%–5.3%)	Ostro 1987 (in Hurley et al 2005)

表 10. 污染物浓度-健康响应关系，用于评估人类暴露于各种颗粒物环境中的健康风险。

健康影响	流行病学基线	单位	参考文献
慢性死亡（各种原因）	1.04%	死亡数/年	国家统计局 2012
肺癌死亡	0.06%	死亡数/年	卫生部 2011
心肺疾病死亡	0.60%	死亡数/年	卫生部 2011
缺血性心脏病死亡	0.07%	死亡数/年	卫生部 2011

婴儿死亡	1.21%	死亡数/年	国家统计局 2012
低出生体重	2.34%	病例数/年	世界银行 2012
哮喘病, 儿童	1.97%	病例数	Chen 2003
哮喘病, 成年人	1.42%	病例数	To et al 2012
慢性支气管炎	0.69%	病例数	卫生部 2011
呼吸疾病住院	1.02%	病例数/年	卫生部 2011
心血管疾病住院	1.37%	病例数/年	卫生部 2011
内科门诊病人	31%	病例数/年	卫生部 2011
儿科门诊病人	13%	病例数/年	卫生部 2011
病假天数	2.34	工作日数/年	卫生部 2011
限制外出活动天数	39.96	工作日数/年	卫生部 2011

表 11. 健康影响评估中的各种疾病的基线发生率。对于哮喘病和慢性支气管炎, 该流行病学关系可应用于已广泛存在的病种, 而不能用于新变种个例。

参考文献

Chen YZ 2003: 中国城区儿童哮喘患病率调查. 中华儿科杂志 2003 年 2 月第 41 卷第 2 期.[A nationwide survey in China on prevalence of asthma in urban children.Chinese Journal of Pediatrics 2003(41)2.]<http://past.cmaped.org.cn/view.asp?id=9650>

Dadvand P et al 2013: Maternal Exposure to Particulate Air Pollution and Term Birth Weight: A Multi-Country Evaluation of Effect and Heterogeneity. Environ Health Perspect 121:367–373.
<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1205575>

Hurley et al 2005: Methodology for the Cost-Benefit analysis for CAFE: Volume 2: Health Impact Assessment. AEA Technology Environment.http://www.cafe-cba.org/assets/volume_2_methodology_overview_02-05.pdf

Kan HD, Chen BH, Chen CH, Wang BY & Fu QY 2005: Establishment of exposure-response functions of air particulate matter and adverse health outcomes in China and worldwide. Biomed Environ Sci. 2005 Jun;18(3):159-63.

Krewski et al 2009: Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality. Research Report 140. Health Effects Institute, Boston, Massachusetts.

Lan T, Zhang XY, Wu Z, Sun Y& Zhang C 2011: 锅炉烟囱高度设置合理性论证的实例分析. 环境科学与管理 36 卷第 2 期. [Examples of the Boiler Chimney Height Rational Argument.Environmental Science and Management 36(2).

Ministry of Health 2011: 2011 中国卫生统计年鉴 [“2011 China Health Statistics Yearbook”].
<http://www.moh.gov.cn/htmlfiles/zwgkzt/ptjnj/year2011/index2011.html>

National Bureau of Statistics 2012: China Statistical Yearbook 2012.
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2012/indexeh.htm>

National Bureau of Statistics 2013: China Environment Statistics Yearbook 2012. China Statistics Press.

Pope et al 2002: Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association. <http://dx.doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>

Pregger T & Friedrich R 2009: Effective pollutant emission heights for atmospheric transport modelling based on real-world information. Environmental Pollution 157:552–560.

Streets DG, Hao JM, Wang SX, Wu Y 2008: Mercury Emissions from Coal Combustion in China. Presentation. International Conference of the UNEP Global Partnership on Atmospheric Mercury Transport and Fate Research, Rome, Italy, April 7-11, 2008. http://www.htap.org/meetings/2008/2008_04/Presentations/07-04-08/2%20-%20Streets.pdf

To T et al 2012: Global asthma prevalence in adults: findings from the cross-sectional world health survey. BMC Public Health 2012, 12:204. <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2458-12-204>

World Bank 2012: Low-birthweight babies (% of births). Data Catalog. <http://data.worldbank.org/indicator/SH.STA.BRTW.ZS>

World Coal Institute 2007: Coal Conversion Facts. [http://www.worldcoal.org/_assetrequest.php?doc=/bin/pdf/original_pdf_file/coalconversionfacts2007\(04_06_2009\).pdf](http://www.worldcoal.org/_assetrequest.php?doc=/bin/pdf/original_pdf_file/coalconversionfacts2007(04_06_2009).pdf)

Wu Y, Streets DG, Wang SX & Hao JM 2009: Uncertainties in estimating mercury emissions from coal-fired power plants in China. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 9, 23565–23588, 2009. www.atmos-chem-phys-discuss.net/9/23565/2009/

Yang & Cui 2012: Global Coal Risk Assessment: Data Analysis and Market Research. WRI Working Paper. World Resources Institute, Washington DC. <http://www.wri.org/publication/global-coal-risk-assessment>

Zhou Y, Levy JI, Evans JS & Hammit JK 2006: The influence of geographic location on population exposure to emissions from power plants throughout China. Environment International 32 (2006) 365 – 373.