HEI

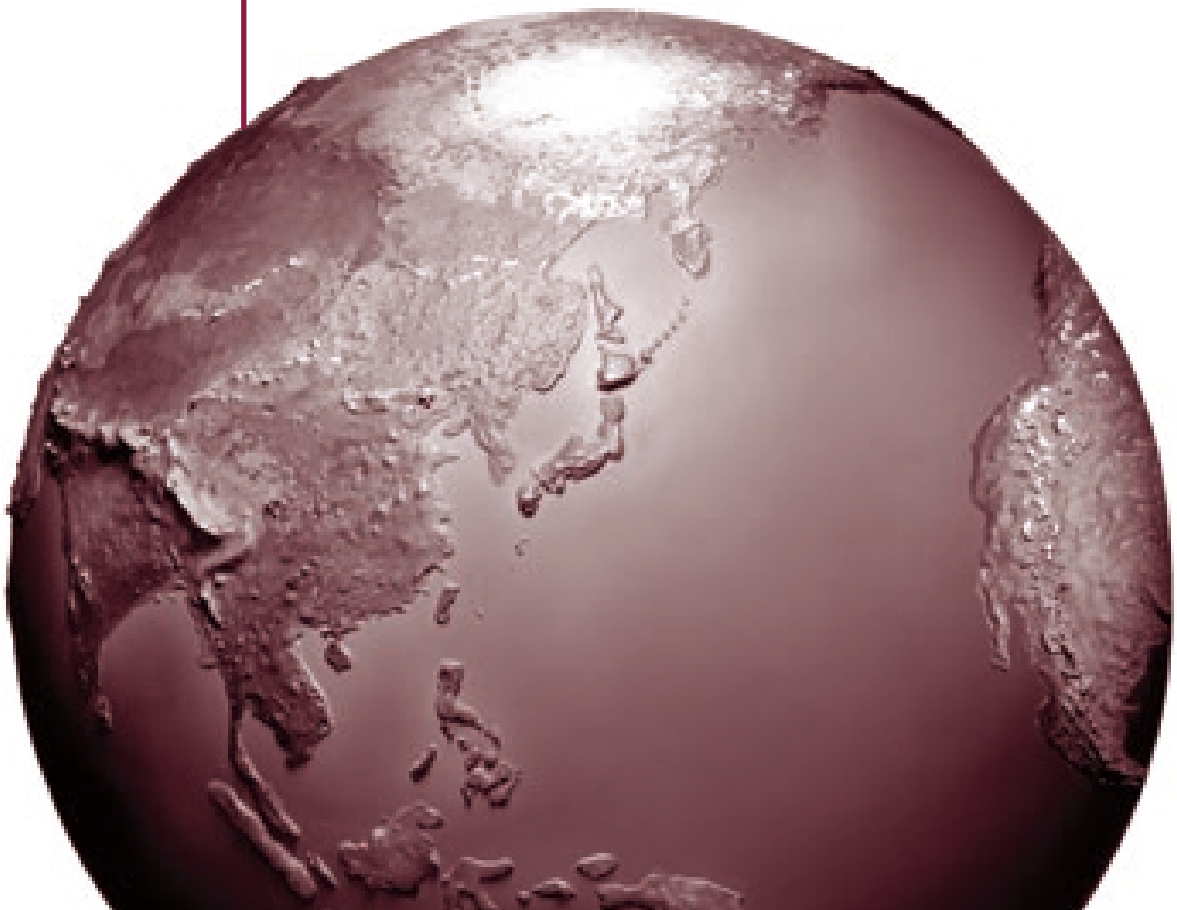
HEALTH EFFECTS INSTITUTE

2016 年 8 月

专题报告 20

燃煤和其他主要大气污染源所致的中国疾病负担

GBD MAPS 工作组



燃煤和其他主要大气污染源
所致的中国疾病负担

GBD MAPS 工作组

专题报告 20
健康影响研究所
波士顿，马萨诸塞州

可信科学 ● 更清洁的空气 ● 更健康

健康影响研究所
75 Federal Street
Suite 1400
Boston, MA 02110
+1-617-488-2300
传真 +1-617-488-2335
www.healtheffects.org

出版记录：该文件于 2016 年 8 月发布在 *www.healtheffects.org*。
文件引用情况：
GBD MAPS 工作组。2016。燃煤和其他主要大气污染源所致的中国疾病负担。专题报告 20。波士顿，MA：健康影响研究所。

©2016 健康影响研究所，波士顿，马萨诸塞州。HEI 报告的国会图书馆目录编号
丛书：WA 754 R432。

关于 HEI

健康影响研究所是 1980 年特许成立的非盈利性组织，是一家就空气污染对健康的影响进行优质、公正且具有针对性的科学研究的独立研究机构。为完成此项使命，该机构

- 确定了健康影响研究的最高优先领域；
- 为研究项目提供具有竞争力的基金并对其进行监督；
- 提供 HEI 支持研究和相关研究的深入独立审查；
- 整合 HEI 与其他机构的研究成果以获得更广泛的评估结果；
- 就 HEI 研究和分析的结果与公共和私人决策者进行沟通。

HEI 通常从美国环境保护局和全球汽车行业接受平衡资金支持。通常情况下，美国和世界各地的其他公共和私人机构同样可对重大项目和研究计划进行支持。GBD MAPS 由 William 和 Flora Hewlett 基金会和 Oak 基金会资助。HEI 在北美、欧洲，亚洲和拉丁美洲资助 330 多个研究项目，研究结果已作为一氧化碳、空气毒物、氮氧化物、柴油机尾气、臭氧、颗粒物和其他污染物相关决策的依据。这些结果已出现在 260 多个由 HEI 出版的综合性报告中，以及 1000 多篇同行评议文献中。

HEI 独立董事会成员包括致力于促进公私伙伴关系的科学和政策领导人，此种关系是该组织的核心。医疗研究委员会将向 HEI 赞助商和其他利益相关方寻求投入，并与科研人员共同制定一个五年战略规划，选择研究项目以获得资金支持，并监督项目执行。但健康审查委员会在选择或监督研究的过程中不会承担任何角色，仅与工作人员共同评估和解释资助研究和相关研究的结果。

由卫生审查委员会执行的所有项目的结果和相应的评述均通过 HEI 网站（*www.healtheffects.org*）、纸质报告、简报和其他出版物、年会和演示文稿向立法机构和公共机构进行广泛告知。

GBD MAPS 工作组

Michael Brauer (cochair)	英属哥伦比亚大学，温哥华，不列颠哥伦比亚省，加拿大
Aaron Cohen (cochair)	健康影响研究所，波士顿，马萨诸塞州，美国
Wang Shuxiao	清华大学，北京，中国
Zhang Qiang	清华大学，北京，中国
Ma Qiao	清华大学，北京，中国
Zhou Maigeng	中国疾病预防控制中心，北京，中国
Yin Peng	国疾病预防控制中心，北京，中国
Wang Yuxuan	德克萨斯州加尔维斯顿大学，美国
Kan Haidong	复旦大学，上海，中国
Randall Martin	达尔豪斯大学，哈利法克斯，新斯科舍省，加拿大
Aaron van Donkelaar	达尔豪斯大学，哈利法克斯，新斯科舍省，加拿大
Richard Burnett	加拿大卫生部，渥太华，安大略省，加拿大
Mohammad Forouzanfar	健康指标和评估研究所，华盛顿 - 西雅图大学，美国
Joseph Frostad	健康指标和评估研究所，华盛顿 - 西雅图大学，美国
Chandra Venkataraman	印度理工学院，孟买，印度
Pankaj Sadavarte	印度理工学院，孟买，印度

GBD MAPS 国际指导委员会

Dan Greenbaum	健康影响研究所，波士顿，马萨诸塞州，美国
Bob O'Keefe	健康影响研究所，波士顿，马萨诸塞州，美国
Terry Keating	美国环境保护局
Hao Jiming	清华大学，北京，中国
Yang Gonghuan	中国协和医科大学，北京，中国
Christopher Murray	健康指标和评估研究所，华盛顿 - 西雅图大学，美国
Majid Ezzati	帝国理工学院，伦敦，英国
K. Srinath Reddy	印度公共健康基金会，新德里，印度
Michal Krzyzanowski	国王学院，伦敦，英国
Greg Carmichael	世界气象组织 / 爱荷华大学，爱荷华市，美国

HEI 出版人员

Carol Moyer	顾问编辑
Zachary Abbott	助理研究员
Hilary Selby Polk	总编辑
Hope Green	出版助理

执行摘要

燃煤和其他主要空气污染源所致的中国疾病负担

此项研究的相关数据

- 该报告旨在从中国国家和省份两级层面，对煤炭燃烧和其他主要空气污染来源所致的当前和预计的疾病负担进行首次全面评估。
- 煤炭燃烧是大气 $PM_{2.5}$ 的最重要来源，占中国人口加权 $PM_{2.5}$ 含量的 40%。燃煤对大气 $PM_{2.5}$ 浓度具有较大影响，是中国疾病负担的重要因素之一，估计在 2013 年造成约 366000 人死亡。
- 来自煤炭（155000 例死亡）和非煤炭（95000 例死亡）排放的工业污染源是造成中国疾病负担的最主要因素，约占 2013 年大气 $PM_{2.5}$ 所致死亡人数的 27%。
- 民用固体燃料燃烧，包括煤炭和生物质，也是在中国疾病负担的重要来源。民用生物质和煤燃烧共同构成 2013 年大气 $PM_{2.5}$ 归因死亡率的第二大因素——其综合影响（177000 例死亡；约占 2013 年大气 $PM_{2.5}$ 归因死亡率的 19%）高于工业用煤（155000 例死亡）、交通事故（137000 例死亡）或燃煤电厂（86500 例死亡）。
- 在四种不同的能源利用和空气污染控制情景下，$PM_{2.5}$ 的人口加权平均暴露量预计可显著下降（至 2030 年，预计 BAU1、BAU2、PC1 和 PC2 可分别从 2013 年的 54μg/m^3 下降至 50、38、38 和 27μg/m^3）。
- 尽管空气污染程度降低，但预计到 2030 年，总体健康负担将随着人口老龄化以及疾病易患性（可能与空气污染关系最为密切）的增加而增加。
- 即使按照最严格的能源消耗和污染控制理念，到 2030 年，煤炭仍将是大气 $PM_{2.5}$ 和健康负担的最大单一贡献来源。该结果显示迫切需要采用更积极的策略，以降低燃煤的排放量，同时降低其他污染源的排放量，该战略已被纳入十三五规划纲要。
- GBD MAPS 的评估表明，减少工业和民用排放量应作为未来能源和空气质量管理战略的优先实施策略。由于民用燃烧所致室内空气污染暴露也导致了大量疾病负担，因此降低民用生物质和煤排放量将对公众健康特别有益。

引言和背景[1]

根据疾病、伤害和风险因素全球负担研究 2013（GBD2013[2]）评估，暴露于大气细颗粒物污染（$PM_{2.5}$[3]）在 2013 年导致 290 万例人口过早死亡，而其中 64%的死亡发生于中国、印度和其他亚洲发展中国家，

---

[1] 该文件部分内容由 William 和 FloraHewlett 基金会以及 Oak 基金会提供支持。该文件的内容并未由这些或其他机构（包括支持健康影响研究所的机构）进行审查；因此，该文件不能体现这些机构的意见或政策，也可由此推断该文件无需获得其批准。

[2] 缩写和其他术语列表请参见执行摘要末尾。

[3] 可吸入颗粒物的空气动力学直径≤ $_{2.5}$μm。

同时还包括东欧的较大疾病负担[4]。GBD 是迄今为止规模最大且最全面评估全球流行病学水平和趋势的研究（*http://www.healthdata.org/gbd*）。目前该研究已纳入 108 个国家 1000 多位合作研究人员。GBD2013 预计 1990-2013 年期间的疾病可归因于 79 种风险因素，包括环境和室内空气污染在内，主要包括 188 个国家，并在中国、英国、墨西哥三个国家的次级行政机构（省）对疾病负担进行研究（Forouzanfar 等人，2015 年）。

对燃煤和其他主要污染源空气污染而导致的疾病负担进行评估和交流是支持大气污染控制和气候污染物排放控制的关键一步。GBD 分析框架非常适合对燃煤和其他主要排放源（包括交通运输、工业和民用燃烧，这些排放源均会导致高度空气污染）进行评估。GBD 研究可以在国家次级行政机构（省）、国家、区域和全球范围内，根据死亡率及空气污染排放和浓度的预测趋势对过去暴露所致疾病负担和未来预计疾病负担进行评估。

GBD MAPS（主要空气污染源所致全球疾病负担）旨在中国、印度和东欧采用 GBD 框架，对燃煤和其他主要 $PM_{2.5}$ 污染源所致环境空气污染导致的当前和未来疾病负担进行评估，并发布这些评估结果，从而为上述地区有计划地制定政策提供参考依据。本研究的最终目标是在全球范围内将该项目所制定的方法应用至多种空气污染源，并把其整合纳入 GBD 框架，使其可以定期更新以实现进度跟踪。GBD MAPS 是健康影响研究所（HEI）、健康指标和评估机构 (IHME)、清华大学、英属哥伦比亚大学和其他著名学术中心之间合作多年的项目。

该报告阐述了中国及其各省 GBD MAPS 分析的目标、方法以及结果。随后将针对印度和东欧出具类似的分析报告。

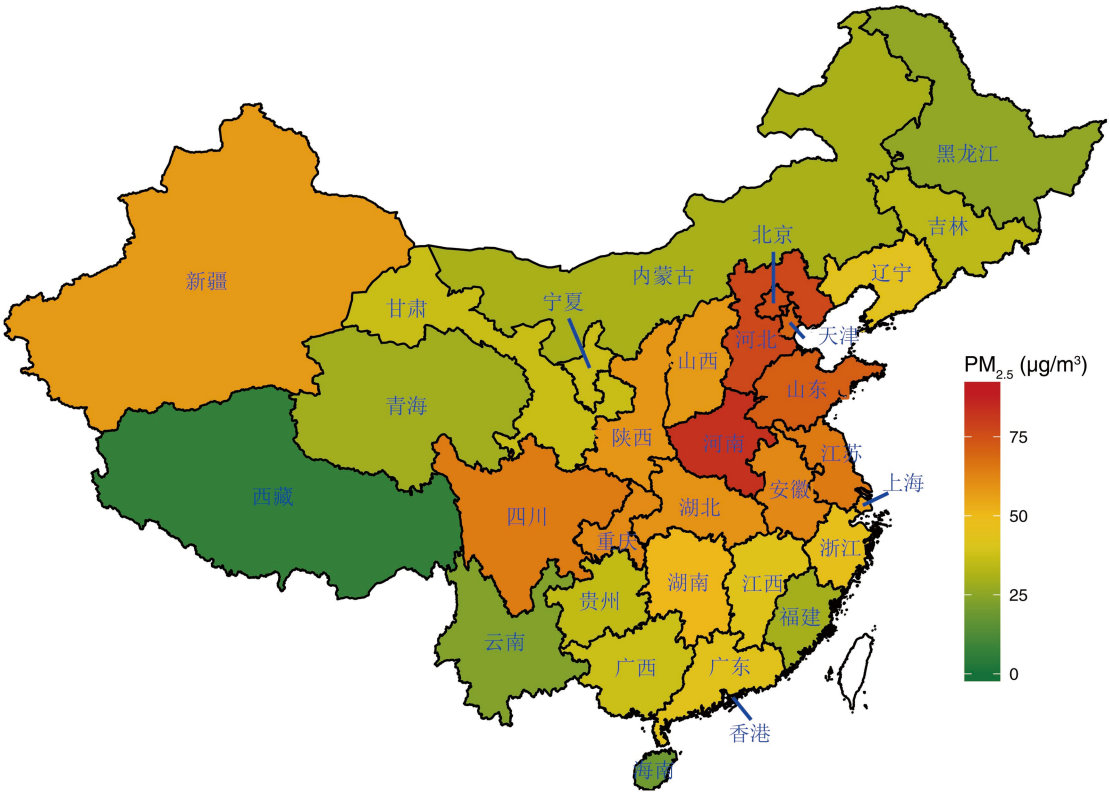
HEI 审查程序

该报告草案的最终版本由 HEI 选定的三个独立外部评审员对报告的准确性、质量和解释恰当性进行审查，三位专家的专业分别为空气质量、大气化学和建模、健康影响。外部评审员分别为：Tong Zhu（北京大学），Markus Amman（IIASA 研究所）和 John Evans（哈佛大学）。该草案亦将由 GBD MAPS 指导委员会专家进行审查。在收到反馈意见之后，工作组撰写最终报告。该报告的主要研究结果还在 2016 年 2 月提交至美国科学促进会，并于 2016 年 5 月在丹佛举行的 HEI 年会上发表。

[4] Cohen A, Brauer M, Burnett R, Anderson HR, Estep K, Frostad J, et al. 环境空气污染所致全球疾病负担：当前负担与未来 23 年趋势评估，GBD2015 研究 .

空气污染排放和影响

在过去二十年里，中国的空气污染程度有所加剧，现在已成为世界上污染程度最高的国家之一。GBD 的评估结果显示，2013 年中国整个国家的 $PM_{2.5}$ 人口加权平均浓度为 54μg/m^3，估计 99.6%的人口生活在超出世界卫生组织（WHO）空气质量指南标准（10μg/m^3）的地区（Brauer 等人，2016 年）。省级层面上，2013 年的 $PM_{2.5}$ 人口加权平均浓度在 6.4μg/m^3（西藏）至 83.5μg/m^3（河南）之间。（执行摘要图 1）。从 1990 年至 2013 年，中国人口加权的 $PM_{2.5}$ 浓度上升了 38%，而一些省份上升幅度超过 40%，例如天津的上升幅度为 45%。



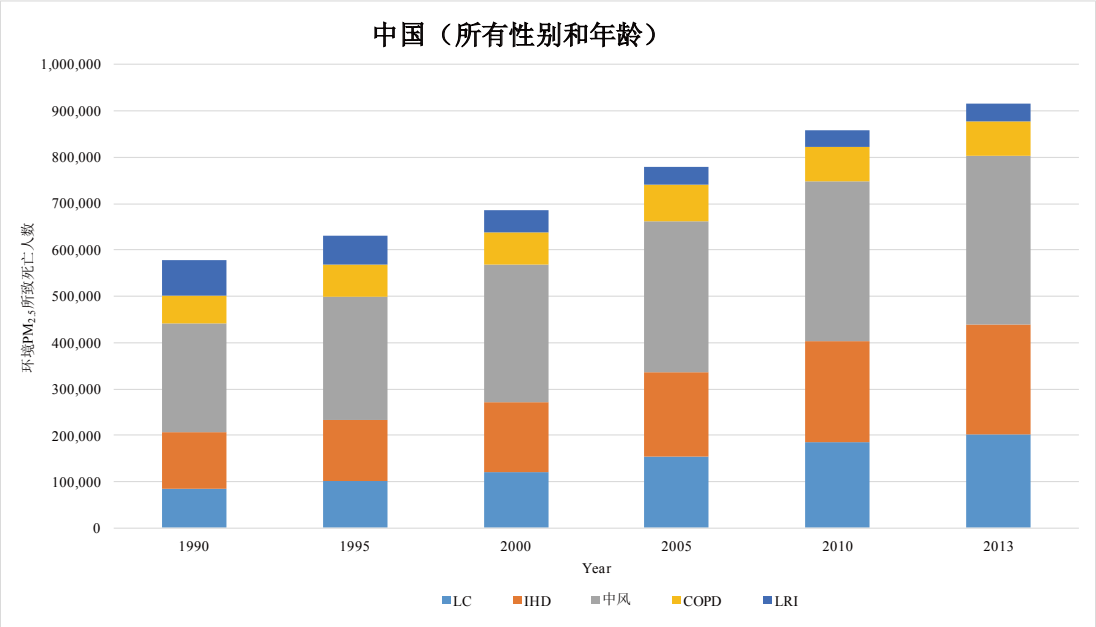
执行摘要图 1. 2013 中国省级人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度。

这些浓度的增加反映出 $PM_{2.5}$ 及其前体的排放量大幅增加。煤炭方面，中国的消费量由 1990 年的 10.552 亿吨增长到 2013 年的 36.23 亿吨。中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，占全球总煤耗的近一半，而燃煤被普遍认为是中国环境空气污染的一个重要因素。对此，国务院在 2013 年 9 月颁布的《大气污染防治行动计划》中确立了中期和长期国家煤炭消费总量目标，该计划随着 2016 年 1 月 1 日新大气污染防治法的生效而得以有效巩固。国务院《大气污染防治行动计划》对大气污染重点地区（如京津冀、长三角和珠三角区域）设定了区域煤炭消费总量目标，要求这些地区降低煤炭消耗，到 2017 年分别实现 $PM_{2.5}$ 平均降低 25%、20%和 15%。

暴露于大气中的颗粒物（PM）对健康有着广泛而重大的影响。有关机构已对此进行详细综述和总结（WHO2005；美国环境保护署 [U.S.EPA]2009）。美国环境保护署确定长期（几个月到几年）暴露于 $PM_{2.5}$ 是造成心血管疾病死亡的原因之一，而不良呼吸效应，如肺功能下降和哮喘均很可能与 PM 的暴露存在因果关系。此外，国际癌症研究机构在 2014 年得出结论，认为大气中的 PM 是导致人类患癌的原因之一（Loomis 等人，2013 年）。

中国研究已成为国际文献重要且不断增长的组成部分。在 2010 年发布的一份全面综述中，HEI 检索到 100 多篇发表于 2007 年之后针对空气污染不良影响研究的中国文献，研究范围涵盖短期暴露于颗粒物所致呼吸系统和心血管系统疾病以及肺癌和慢性呼吸道疾病的发病率和死亡率的研究（HEI 2010）。自此之后，针对空气污染的不利影响进行流行病学研究的中国文献数量大幅增加，包括针对短期暴露于空气污染的多城市研究、心血管和呼吸系统疾病死亡率和发病率的研究（Chen 等人，2012 年；Wong 等人，2008），以及长期暴露于空气污染与死亡率的队列研究（Cao 等人，2011 年；Zhou 等人，2014 年）等。

GBD 2013 估计全球有 290 万人口因空气污染过早死亡，其中 916000 例死亡发生于中国。心血管疾病、心脏疾病和中风是这些死亡的最主要原因，自 1990 年以来已逐渐增加（执行摘要图 2）（Cohen 等人，评阅中）。在人口密集区域，$PM_{2.5}$ 很大一部分源自燃烧过程，包括一次 PM 污染源（直接排放）和二次 PM 污染源（气态前体物的大气转化）。另外，用于烹饪和取暖的固体燃料（如煤、生物质）燃烧所致的室内空气污染也是导致中国疾病负担的重要原因，估计在 2013 年有 807000 人因此死亡。

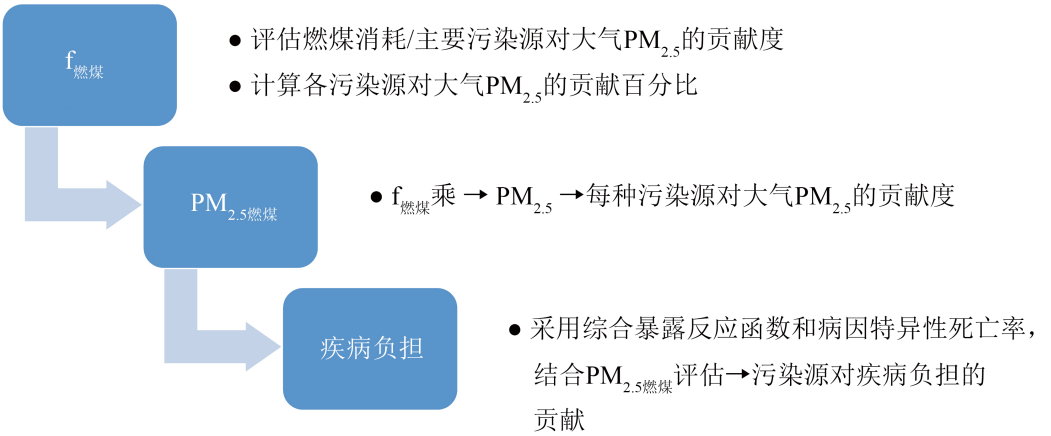


执行摘要图 2. 1990 至 2013 年 $PM_{2.5}$ 所致死亡人数（按年份和死因列出）。（LC= 肺癌，IHD= 缺血性心脏病，COPD= 慢性阻塞性肺病，LRI= 下呼吸道感染）。

燃煤和其他主要空气污染源所致疾病负担评估

GBD MAPS 的总体分析方法主要包括三个部分：（执行摘要图 3）。

1. 采用化学传输模型 GEOS-CHEM 评估 2013 年以及 2030 年四种不同能源利用和污染控制情景下的燃煤和其他主要排放源对大气 $PM_{2.5}$ 的贡献比例。
2. 结合这些贡献比例和 GBD 高分辨率大气 $PM_{2.5}$ 浓度估计值评估不同排放源对人群暴露的贡献比例。
3. 在国家和省级层面，通过（a）GBD 的病因特异性疾病负担估算以及（b）用于描述心肺疾病空气污染死亡率风险的综合暴露——响应（IER）函数，结合燃煤和其他特定污染源大气 $PM_{2.5}$ 的估算结果对中国疾病负担的源贡献进行评估。



执行摘要图 3. 对 2013 年及 2030 年四种情景的燃煤和其他主要污染源所致疾病负担进行评估的 GBD MAPS 方法学示意图。

燃煤和其他主要来源所致的当前疾病负担

我们就 2013 年全中国及各省市燃煤所致大气 $PM_{2.5}$ 导致的疾病负担按主要来源行业（主要针对交通运输、非煤型行业、民用生物质燃烧、生物质开放燃烧燃烧及溶剂使用）分别进行了核心分析及独立分析。

首先，基于亚洲模型比较研究计划（MICS）III 的 2010 年排放清单，我们建立了 2013 年中国境内二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_x）、PM_{10}、$PM_{2.5}$、黑碳（BC）、有机碳（OC）、非甲烷挥发性有机化合物（NMVOC）和氨（NH_3）的排放清单。各省各行业的排放量均根据活动水平数据（能源消耗、工业产品、溶剂使用等）、基于技术的排放系数和控制技术普及率等进行计算。各行业的活动水平数据及技术分布源自中国的相关统计数据、各类中国技术报告以及能源需求模型。

利用 Goddard 地球观测系统全球化学传输模型 GEOS-Chem（v9-01-03 版本）进行模拟，以评估燃煤（和其他行业）对当前和未来大气 $PM_{2.5}$ 的贡献。首先采用基准年（2013 年）排放清单进行标准模拟。敏感性模拟是分别把燃煤总排放量及不同行业的燃煤排放量从排放清单中移除。采用最新清单按次序运行 GEOS-Chem 全球模式及嵌套网格模式。因此，模拟结果所描述的是去掉燃煤排放源之后的大气 $PM_{2.5}$ 浓度。我们通过分析标准模拟和敏感性模拟之间的差异来评估总燃煤量及不同行业燃煤量对大气 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。这样就考虑了大气转化和前体形成 $PM_{2.5}$ 的复杂性。敏感性模拟包括了分别去除总燃煤、电力燃煤、工业燃煤及民用燃煤排放量对环境的影响。

之后将 GEOS-Chem 模拟所预测的燃煤及其他污染源的网格化贡献率与 GBD 2013 得到的高分辨率 (0.1° ×0.1°) 大气 $PM_{2.5}$ 浓度估计值相乘。上述 $PM_{2.5}$ 浓度估计值合并了：（a）基于卫星的评估结果 + GEOS-Chem 模拟结果，（b）TM5–FASST（快速情景筛选工具）化学传输模型模拟，及（c）根据可用的年平均 PM 测量值以预测燃煤导致的大气 $PM_{2.5}$。该方法纳入了 2013 年可获得的中国 $PM_{2.5}$ 浓度监测值，其中包括约 80 个站点的 $PM_{2.5}$ 监测值以及约 300 个站点的 PM10 监测值（用于根据 $PM_{2.5}$:PM10 的比值估算 $PM_{2.5}$ 值）。

之后，综合燃煤和其他特定污染源所致大气 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布和 IER 函数 (用以预测 $PM_{2.5}$、成人缺血性心脏疾病、中风、慢性阻塞性肺病、肺癌以及儿童和成人急性下呼吸道感染的相对风险) 来评估全中国及各省的各行业对疾病负担的贡献。

燃煤所致的未来疾病负担

目前已开发四种不同的能源利用和空气污染控制情景，以反映未来不同的排放途径及其所包含的能源利用和排放控制方面的转变（执行摘要表）。这些情景将用于 2030 年死亡率和疾病负担预测的分析。我们同时预测 2030 年燃煤和其他主要污染源对大气 $PM_{2.5}$ 的贡献程度以及各情景实施下的相关疾病负担——即同时考虑未来死亡率预测及未来排放情景。

执行摘要表 2030 年四种未来情景的定义		
能源政策	**末端排放控制策略**	
	[1] 十二五环境保护规划	[2] 不计成本的最大减排情景
BAU：截至 2012 年年底的当前立法和实施情况	BAU[1]	BAU[2]
PC：实施其他节能减排政策，包括改变生活方式，调整结构及提高能源使用效率。	PC[1]	PC[2]

为预测四种未来情景中每种情景的未来（2030 年）死亡率和疾病负担，通过比例缩放暴露量的 GBD2013 估计值，对未来人群加权 $PM_{2.5}$ 浓度及未来死亡率进行评估，缩放比例为每种情景的 2030 年大气 $PM_{2.5}$ 浓度与 2013 年水平的比值。而对于死亡率，则将 1990 年至 2013 年死亡率动态变化趋势和归因分析结果应用于 2030 年。

结果和结论

该报告旨在从中国国家和省份两级对燃煤和其他主要空气污染源所致的疾病负担进行第一次全面评估。

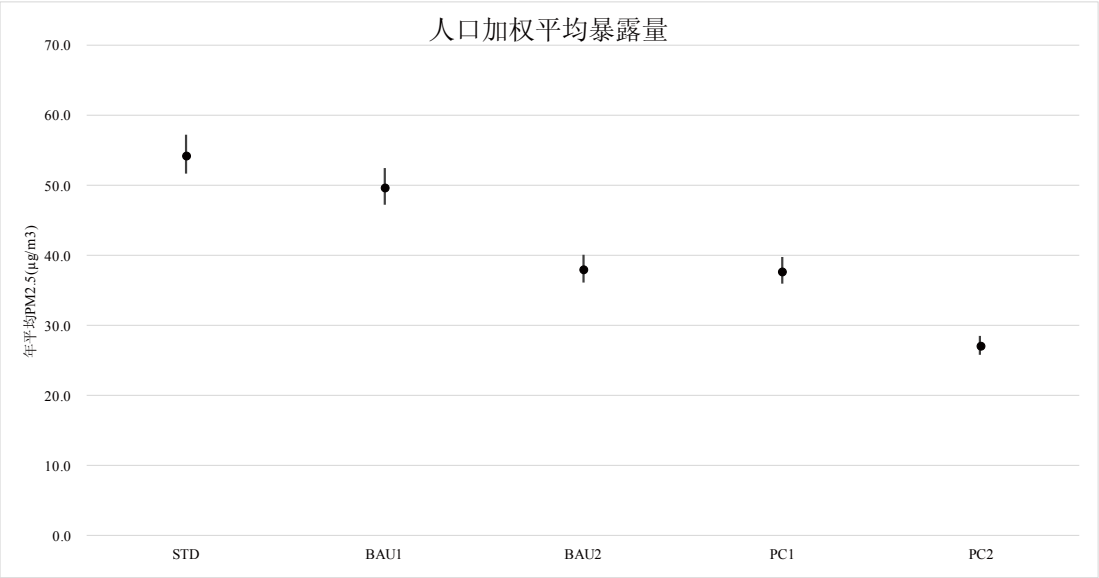
燃煤是大气 $PM_{2.5}$ 的最重要来源因素，占中国地区人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度的 40%。而在特定省市（重庆、贵州、四川），其贡献率甚至高达近 50%。我们将我们的评估结果与中国三大城市污染源解析的数据进行比较，同时亦将我们的评估结果与选定中国城市基于模型的预测结果进行比较。评估结果显示，燃煤对大气 $PM_{2.5}$ 贡献的程度与污染源解析的结果非常类似，但我们的评估结果略高于后者（3%–4%）。同时，我们的评估结果在某种程度上低于基于模型的评估结果。

在中国，大气 $PM_{2.5}$ 是导致死亡和疾病负担的主要因素；据估计，大气 $PM_{2.5}$ 在 2013 年导致 916,000 人死亡，已成为致死的第五大风险因素。由于燃煤对大气 $PM_{2.5}$ 浓度具有极大影响，因此燃煤是中国疾病负担的重要贡献因素之一，估计在 2013 年造成约 366,000 人死亡（执行摘要图 3）。2013 年，燃煤导致的大气 $PM_{2.5}$ 已成为中国地区引发死亡的第 12 大风险因素，其所致死亡率高于高胆固醇、吸毒或二手烟。

煤炭和生物质等民用固体燃料燃烧也是中国疾病负担的重要来源之一。民用生物质和煤燃烧共同成为 2013 年大气 $PM_{2.5}$ 归因死亡率的第二大贡献者 - 综合影响（177,000 例死亡）高于工业用煤（155,000 例死亡）、交通运输（137,000 例死亡）或燃煤电厂（86,500 例死亡）。民用生物质燃烧所造成的大气污染归因死亡率与工业用煤和交通运输所造成的大气污染的归因死亡率基本相等。考虑到民用生物质排放对疾病负担的重大贡献（通过空气污染暴露）及其对大气 $PM_{2.5}$ 的重要贡献，降低民用生物质和燃煤的排放有可能大幅度降低疾病负担，应作为未来能源和空气质量管理战略的优先控制源。

未来情景

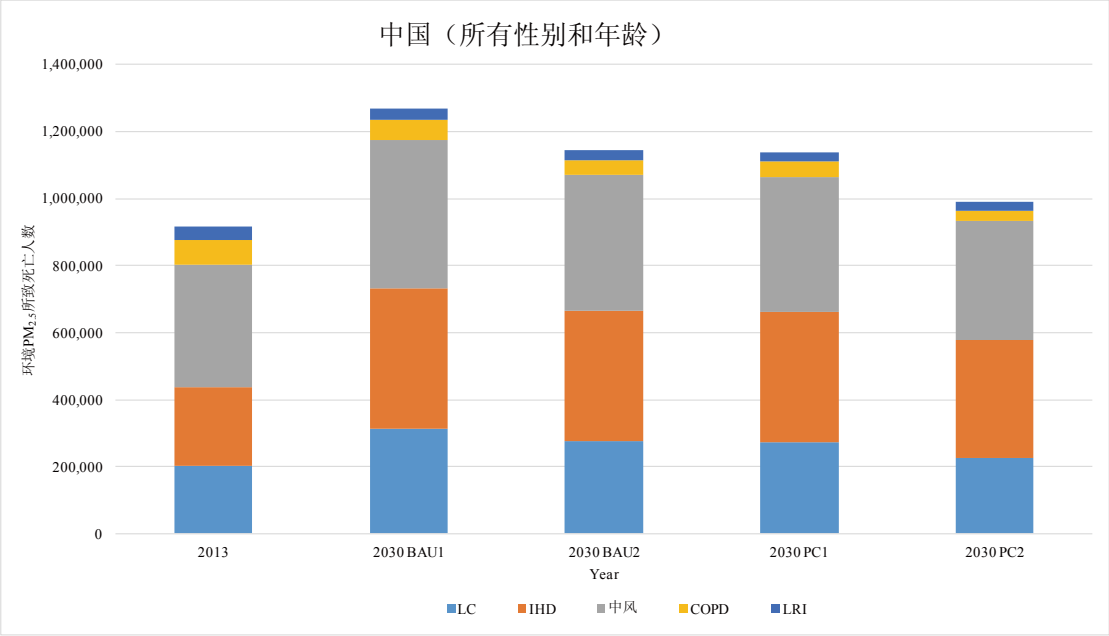
所有情景下的 $PM_{2.5}$ 人口加权平均暴露量预计均会降低（BAU1、BAU2、PC1 和 PC2 从 2013 年的 54μg/m^3 分别降低至 2030 年的 50、38、38 和 27μg/m^3）（执行摘要图 4）。



执行摘要图 4. 四种未来情景下的 $PM_{2.5}$ 人口加权平均暴露量

尽管在所有未来情景中 $PM_{2.5}$ 水平均降低，但与 2013 年的死亡率（916,000 例）相比，预计四种未来情景（BAU1、BAU2、PC1 和 PC2）将导致 $PM_{2.5}$ 所致死亡率分别上升 38％、25％、24％和 8％。具体而言，在 2030 年，四种未来情景（BAU1、BAU2、PC1 和 PC2）中的大气 $PM_{2.5}$ 将分别导致 130、110、110 和 99 万人死亡。

预计的死亡率增加的原因在于人口老龄化以及缺血性心脏疾病、中风、慢性阻塞性肺病与肺癌的发病率增加，从而导致暴露于大气 $PM_{2.5}$ 所造成的死亡人数增加（执行摘要图 5）。该预测结果表明人口动态对确定大气 $PM_{2.5}$ 所致死亡率的动态变化趋势具有重要作用。GBD 2013 预计 1990 年至 2013 年之间的 $PM_{2.5}$ 暴露量、$PM_{2.5}$ 所致死亡人数和 $PM_{2.5}$ 所致死亡率均有所增加，而未来预测的结果则为归因性死亡率增加，虽然 $PM_{2.5}$ 暴露量下降。

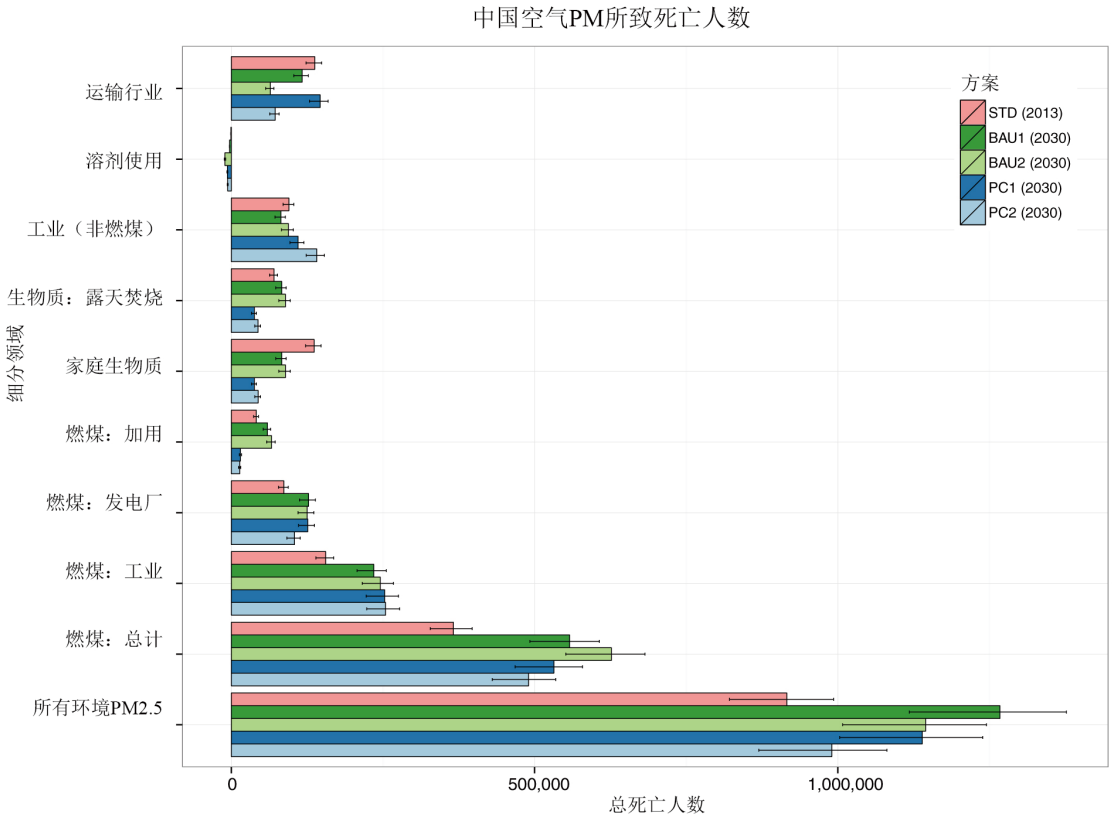


执行摘要图 5. 2013 至 2030 年 $PM_{2.5}$ 所致死亡人数（按年份和死因）。2030 年 GBD MAPS四种污染降低情景下的死亡人数。

2013 至 2030 年之间的差异在很大程度上反映了人口老龄化的影响以及空气污染暴露所致患病率的变化。不同情景在 2030 年的差异反映了能源政策和污染控制的影响。

然而重要的是，如果根据年龄和人口规模进行标准化，预期 2030 年所有情景下因暴露于空气污染而导致的死亡率均将降低，而最严格情景下的降幅最大。因此，严格控制 PM 水平对稳定或降低人口结构变化所导致的负担具有关键作用。

预计在未来所有情景下，燃煤对 $PM_{2.5}$ 所致死亡的影响均将增强，因此燃煤仍将是大气 $PM_{2.5}$ 最大的单一贡献行业（执行摘要图 6）。



执行摘要图 6. 2013 年和 2030 年四种备选情景下来自主要大气污染源的 $PM_{2.5}$ 所致死亡人数。

实际上，即使在最严格的能源消耗和污染控制情景下，2030 年煤炭仍将是大气 $PM_{2.5}$ 和健康负担的最大单一贡献来源。2013 年，燃煤占 $PM_{2.5}$ 所致死亡率的 40％；而 2030 年，在 BAU1、BAU2、PC1 和 PC2 情景下的 $PM_{2.5}$ 所致死亡率中，燃煤所占比重分别约为 44％、55％、47％和 49％。另外，因燃煤造成的大气 $PM_{2.5}$ 降幅低于其他行业，从而导致燃煤对疾病负担的相对贡献度增加。该结果显示迫切需要采取更积极的策略，以降低燃煤的排放量，同时降低其他污染源的排放量，该战略已纳入十三五规划纲要。

参考文献

Brauer M, Freedman G, Frostad J, van Donkelaar A, Martin RV, Dentener F, et al.2016.2013 年全球疾病负担的环境空气污染暴露估计值。Environ Sci Technol 50:79–88; doi:10.1021/acs.est.5b03709.

Cao J, Yang C, Li J, Chen R, Chen B, Gu D, et al.2011. 中国室外空气污染长期暴露和死亡率相关性的队列研究。J Hazard Mater 186:1594–1600.

Chen R, Kan H, Chen B, Huang W, Bai Z, Song G, et al.2012. 颗粒物空气污染与每日死亡率相关

性：中国空气污染和健康影响研究。Am J Epidemiol 175:1173–1181.

Forouzanfar MH, Alexander L, Anderson HR, Bachman VF, Biryukov S, Brauer M, et al.2015.188 个国家 79 种行为、环境和职业以及代谢风险或风险群的全球、地区和国家相对风险评估结果（1990-2013 年）：2013 年全球疾病负担研究的系统评价。Lancet 386:2287–2323.

Health Effects Institute.2010. 亚洲发展中国家室外空气污染与健康综述。专题报告 18.Boston, MA:Health Effects Institute.

Loomis D, Grosse Y, Lauby-Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Benbrahim-Tallaa L, et al.2013. 室外空气污染的致癌性。Lancet Oncol 14:1262–1263.

U.S. Environmental Protection Agency.2009. 终期报告：颗粒物质的综合性科学评估。EPA/600/R-08/139F.Washington, DC:U.S.EPA.

Wong CM, Vichit-Vadakan N, Kan H, Qian Z. 2008. 亚洲公共卫生和空气污染研究（PAPA）：空气污染对死亡率短期影响的多城市研究。Environ Health Perspect 116:1195–1202.

World Health Organization (WHO).2005. 颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的 WHO 空气质量指南。全球更新 2005.Available: http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1.

Zhou M, Liu Y, Wang L, Kuang X, Xu X, Kan H. 2014. 颗粒物空气污染与中国男性死亡率的队列研究。Environ Pollut 186:1–6.

缩写和其他术语

BAU	一切照常情景
BC	黑炭
GBD MAPS	主要空气污染源所致全球疾病负担
GEOS-Chem	Goddard 地球观测系统全球化学传输模型
HEI	健康影响研究所
IER	综合暴露 - 响应
NH3	氨气
NMVOC	非甲烷挥发性有机化合物
NOx	氮氧化物
OC	有机碳
PC	（备选）政策情景

PM	颗粒物
PM10	空气动力学直径≤ 10μm 的颗粒物
$PM_{2.5}$	空气动力学直径≤ 2.5μm 的颗粒物
SO2	二氧化硫
U.S. EPA	美国国家环境保护署
WHO	世界卫生组织

HEI 相关出版物

编号	标题	作者 / 主要研究者	日期
研究报告 154	亚洲公共卫生与空气污染（PAPA）：在四个城市进行的短期暴露于空气污染与每日死亡率协调研究	HEI 亚洲计划的公共卫生和空气污染	2010 年 11 月
	第 1 部分：中国上海的大气污染与每日死亡率时间序列研究	H. Kan	
	第 2 部分：中国武汉大气污染与每日死亡率相关性研究以及根据极高温进行效应调整的中国	Z. Qian	
	第 3 部分：空气污染对泰国曼谷死亡率影响的估计值	N. Vichit-Vadakan	
	第 4 部分：空气污染与呼吸道病毒之间的相互作用：香港每日死亡率和住院率的时间序列研究	C.-M. Wong	
	第 5 部分：亚洲公共卫生与空气污染（PAPA）：四项针对空气污染和死亡率的研究的综合分析	C.-M. Wong，代表 PAPA 团队	
专题报告 18	亚洲发展中国家的室外空气污染与健康：综合评述	HEI 国际科学监督委员会	2010 年 11 月

HEI 理事会和工作人员

理事会

Richard F. Celeste 主席 科罗拉多学院荣誉主席
Sherwood Boehlert 雅高集团法律顾问、美国众议院科学委员会前主席
Enriqueta Bond 宝来惠康基金名誉主席
Purnell W. Choppin 霍华德·休斯医学研究所名誉主席
Michael T. Clegg 加州大学欧文分校生物科学教授
Jared L. Cohon 卡内基·梅隆大学土木与环境工程及工程和公共政策学院名誉院长、教授
Stephen Corman 科尔曼企业总裁
Linda Rosenstock 加州大学洛杉矶分校卫生政策与管理、环境健康科学和医学名誉院长、教授
Henry Schacht 华平投资集团总经理、朗讯科技前主席兼首席执行官
Warren M. Washington 美国国家大气研究中心资深科学家、国家科学委员会前主席

官员和工作人员

Daniel S. Greenbaum 主席
Robert M. O'Keefe 副主席
Rashid Shaikh 科学总监
Jacqueline C. Rutledge 财务与行政总监
April Rieger 公司秘书

Zachary Abbott 研究助理
Hanna Boogaard 研究员
Aaron J. Cohen 首席科学家
Maria G. Costantini 首席科学家
Philip J. DeMarco 合规经理
Hope Green 出版助理
Anny Luu 行政助理
Hilary Selby Polk 总编辑
Robert A. Shavers 运营经理
Tyler Trainor 会计师
Annemoon M.M. van Erp 管理科学家