# 危险的呼吸 2

## 大气PM2.5对中国城市公众健康效应研究



GREENPEACE 绿色和平

# 大气 $PM_{2.5}$ 对中国城市公众健康效应研究

潘小川 刘利群 张思奇 李国星 等编著

**编委会**

编委会成员

潘小川 刘利群 张思奇 李国星 董文坦 郭群 / 北京大学公共卫生学院

报告协调人

王秋霞 张凯 刘晓姿 Lauri Myllyvirta / 绿色和平

数据支持

全国空气质量指数

# 目录

**摘要** ..... **2**

**术语列表** ..... **4**

**一. 背景** ..... **5**

1. 中国城市 $PM_{2.5}$ 的污染现状 ..... 5
2. 前期的研究 ..... 14

**二. 目的** ..... **20**

**三. 方法** ..... **20**

1. 研究思路概述 ..... 20
2. 整合风险函数 ..... 21

2.1 整合风险函数的假设条件 ..... 24

2.2 整合风险函数的模型形式和 RR 值的确定 ..... 25

3. 计算可避免的超额死亡人数 ..... 28

**四. 结果** ..... **29**

1. 可避免的超额死亡人数 ..... 29
2. 每十万常住人口中可避免的超额死亡人数 ..... 32

**五. 讨论** ..... **34**

1. 不同 $PM_{2.5}$ 浓度水平下的超额死亡情况 ..... 34
2. 不同 $PM_{2.5}$ 浓度水平下每十万常住人口中的超额死亡情况 ..... 34
3. $PM_{2.5}$ 污染造成的超额死亡与吸烟导致的超额死亡人数比较 ..... 35
4. 本研究的局限性 ..... 36
5. 政策建议 ..... 36

**参考文献** ..... **38**

## 摘要

《大气 $PM_{2.5}$ 对中国城市公众健康效应研究》报告是继《$PM_{2.5}$ 的健康危害和经济损失评估研究》后，绿色和平再度委托北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系开展的研究。研究关注的地区为中国 31 座省会城市和直辖市，采用细颗粒物暴露造成的全球疾病负担估算过程中的“整合风险函数”方法，定量估测了各城市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度上升对居民死亡风险造成的影响。

研究获得了各城市2013年年平均 $PM_{2.5}$ 浓度数据(**基线情景**),选取了三个“情景目标”,分别为大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从2013年实测值下降达到城市2017年 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标值（**2017 情景**），达到中国《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级浓度限值 35μg / $m^3$（**国标情景**），及达到世界卫生组织（WHO）空气质量准则值 10μg / $m^3$（**WHO 情景**）。根据世界卫生组织对年均颗粒物空气质量准则值的制定依据解释，在超过空气质量准则值水平下长期暴露，死亡率、心肺疾病死亡率等会明显增加，换言之，即可认为长期暴露于 WHO 情景下造成超额死亡可忽略。而长期暴露于国标情景、2017 情景和基线情景下均会造成一定的超额死亡。研究想要估算，31 个省会城市或直辖市的大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从基线情景下降达到三个目标情景时，分别可避免的病因别超额死亡数。

首先，我们计算 WHO 情景、国标情景和 2017 情景相对于基线情景，缺血性心脏病(ICD-10 编码：I20-I25)、脑血管病(I60-I69)、肺癌(C33-C34)和慢性阻塞性肺疾病(J40-J44)四种病因别死亡率的相对危险度，据此，我们可计算各城市大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从 2013 年实测值分别下降达到 2017 情景、国标情景和 WHO 情景三个目标后，可避免的上述四种病因别的超额死亡数，和每个城市每十万人口中可避免的上述四种病因别的超额死亡数。

研究结果显示，与最清洁的 WHO 情景相比，在基线情景即 2013 年 $PM_{2.5}$ 污染暴露水平下，31 个省会城市或直辖市中共发生了 25.7 万例超额死亡。在 21 座已经制定了明确的 2017 年 $PM_{2.5}$ 下降目标的城市中，如能达到 2017 情景暴露水平，总共可避免 26218 例超额死亡。除拉萨、海口及福州三座已经达到国家 $PM_{2.5}$ 浓度二级标准的城市外，其他 28 座省会城市及直辖市，如能达到国标情景暴露水平，总共可避免 112357 例超额死亡。

与最清洁的 WHO 情景相比，2013 年浓度值水平下的 $PM_{2.5}$ 污染在石家庄造成了最多例超额死亡（研究关注的四种病因别超额死亡之和，下同），石家庄也正是 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度值最高的城市。但城市每十万人口中的超额死亡人数排序与城市 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度排序并不完全相同。某些南方城市虽然 $PM_{2.5}$ 年均浓度相对不算高，每十万人口中的超额死亡人数排位却很靠前。31 座省会城市和直辖市平均的每十万人口中的超额死亡人数为 89 例。在 21 座已经制定了明确的2017年 $PM_{2.5}$ 下降目标的城市中，如能达到2017情景下的暴露水平，平均每十万人口中，可避免 11 例超额死亡。京津冀和长三角地区的城市，每十

万人口中可避免超额死亡人数排位几乎都很靠前。除拉萨、海口及福州外的其他28座省会城市及直辖市，如能达到国标情景暴露水平，平均每十万人口中，可避免41例超额死亡。石家庄每十万人口中可避免超额死亡人数最多，为77例。

过去两年国家已有一系列相关政策出台，治理$PM_{2.5}$污染也显现了一定效果，但仍与公众的愿望有差距。基于本研究结果，建议2015年底的《大气污染防治行动计划》的中期评估成为全国各地重新调整和整理治霾目标和措施的契机，首先确保2017年各地$PM_{2.5}$下降目标的达成。除此以外，还建议政府从能源结构调整，制订逐年改善目标促使重点城市$PM_{2.5}$年均值科学合理地达到$35mg/m^3$，开展地级市$PM_{2.5}$浓度下降目标考核，展开大气污染对城市居民长期健康效应影响评估等方面着手，加大力度，加快中国$PM_{2.5}$污染的治理进度，尽量降低公众因此而付出的健康代价。

## 术语列表

| | |
|---|---|
| 相对危险度 | 相对危险度（Relative Risk, RR）是流行病学中的一个概念，指暴露组与对照组的危险度之比。又称率比（rate ratio），是暴露组发病率（Ie）与非暴露组发病率（Iu）的比值。在本研究中是指细颗粒物在不同水平年平均浓度下，所关注的病因别死亡率的危险度之比。 |
| 95%可信区间 | 是指在 0.95 的置信水平上，某个参数的总体均数值的取值范围，即该参数均值有 95%的可能性落在该范围内。 |
| 非意外总死亡率 | 除去意外伤害外，某特定人群在一定时间内，所有死于其他原因死亡的频率。在本研究中，是指某地常住人口在一年内死亡的频率。 |
| 病因别死亡率 | 一定人群在一定期间内，死于某病因的频率。在本研究中，是指在一年内，某地常住人口死亡的频率。 |
| 超额死亡人数 | 指某一个地区人群中实际死亡人数与预期死亡人数之差。在本研究中特指由 $PM_{2.5}$ 造成的，把所有其他影响死亡率的危险因素均包含在背景值内，造成的死亡作为预期死亡人数。 |
| ICD-10 | ICD-10 是第十版国际疾病分类（10th revision of the International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems）的简称。国际疾病分类是世界卫生组织制定的国际统一的疾病分类方法。 |

# 一． 背景

## 1. 中国城市 $PM_{2.5}$ 的污染现状

随着中国经济的快速发展，城市化进程的加速，能源消耗和大气污染物排放总量不断增加，中国空气质量也面临着严峻的挑战，尤其是大气细颗粒物（$PM_{2.5}$）污染。自 2011 年以来，雾霾频繁在京津冀、长三角等地爆发，成为公众最为关注的环境问题。2012 年 2 月 9 日，中国环保部与国家质量监督检验检疫总局联合发布新版《环境空气质量标准》（GB3095-2012）。与前一版标准相比，新标准增加了 $PM_{2.5}$ 和臭氧 8 小时浓度限值的监测指标。该标准将于 2016 年 1 月 1 日起在全国范围内实施。按照国家环保部 2012 年 3 月制定的新空气质量标准“三步走”实施方案，京津冀、长三角、珠三角等重点区域及直辖市、省会城市和计划单列市共 74 个城市、496 各监测点，已于 2013 年开始按照新标准开展环境空气污染物监测，将大气 $PM_{2.5}$ 和臭氧浓度作为常规污染物监测项目。$PM_{2.5}$ 信息的公开，进一步暴露了雾霾作为全国性环境问题的严重性。

### 1.1 2013 年中国主要城市 $PM_{2.5}$ 污染情况

2013 年以来，中国中东部地区先后遭遇多次大范围持续雾霾天气，严重影响到人民群众正常的生产生活和身体健康。中国雾霾污染过程多呈现出污染范围广、持续时间长、污染程度严重、污染物浓度累积迅速等特点，且基于第一批实施环境空气质量新标准的 74 个城市的空气质量监测结果，污染过程中首要污染物均以 $PM_{2.5}$ 为主。

据气象卫星遥感监测显示，2013 年 1-10 月，全国共有 20 个省（区、市）出现持续性雾霾。1 月份平均每日雾霾覆盖范围为 71.6 万平方公里，其中 1 月 22 日达 222 万平方公里，几乎覆盖了整个中东部地区；10 月 20-22 日，北方地区出现严重雾霾过程，内蒙古东部和东北地区影响范围约 40.8 万平方公里。2014 年 2 月下旬，中国中东部地区大部分省份再次出现持续雾霾，持续时间超过一周，影响面积一度高达 143 万平方公里，重霾面积约为 81 万平方公里。

中国环保部基于空气质量的监测结果表明，2013 年 1 月和 12 月，中国中东部地区发生了 2 次较大范围区域性灰霾污染。其中，1 月份的灰霾污染过程接连出现 17 天，造成 74 个城市发生 677 天次的重度及以上污染天气(当日空气质量指数 AQI＞200)，其中重度污染（200＜AQI 重度污染）477 天次，严重污染（AQI

>300）200 天次。污染较重的区域主要为京津冀及周边地区，特别是河北南部地区，石家庄、邢台等为污染最重城市。12 月 1 日至 9 日，中东部地区集中发生了严重的灰霾污染过程，造成 74 城市发生 271 天次的重度及以上污染天气，其中重度污染 160 天次，严重污染 111 天次。污染较重的区域主要为长三角区域、京津冀及周边地区和东北部分地区，长三角区域为污染最重地区。

中国环保部发布的《2013 年中国环境状况公报》指出，第一批实施环境空气质量新标准的 74 个城市，2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度范围为 26~160μg/m$^3$，平均浓度为 72μg/m$^3$，达《环境空气质量标准》（GB3095-2012）规定的年均值二级浓度限值（35μg/m$^3$）的城市比例仅为 4.1%。其中京津冀区域 $PM_{2.5}$ 年平均浓度为 106μg/m$^3$，长三角区域为 67μg/m$^3$，珠三角区域为 47μg/m$^3$；三大重点区域中，京津冀和珠三角区域所有城市的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度均未达标，长三角区域仅舟山达标。从表 1 中给出的 2013 年中国 74 城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度可以看出，全国空气质量较差的前 10 位城市（邢台、石家庄、邯郸、唐山、保定、济南、衡水、西安、廊坊和郑州），$PM_{2.5}$ 年均浓度几乎都超过国家标准的二级浓度限值的 2 倍以上。严重的 $PM_{2.5}$ 污染不仅局限在京津冀、长三角和珠三角等较发达地区，中西部省份也凸显出大气污染问题，西安、郑州、武汉、成都、乌鲁木齐等城市 2013 年的 $PM_{2.5}$ 年均浓度也都超标一倍以上。

表 1 根据「全国空气质量指数」提供的数据计算所得 2013 年中国 74 城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度（南北以淮河为界划分）

| 城市 | $PM_{2.5}$ 年均浓度（$\mu g/m^3$） | 城市 | $PM_{2.5}$ 年均浓度（$\mu g/m^3$） | 城市 | $PM_{2.5}$ 年均浓度（$\mu g/m^3$） |
|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 92.91 | 上海 | 64.70 | 丽水 | 53.96 |
| 天津 | 94.46 | 杭州 | 67.96 | 连云港 | 60.28 |
| 石家庄 | 137.02 | 南京 | 77.33 | 南宁 | 47.09 |
| 哈尔滨 | 79.26 | 广州 | 48.43 | 南通 | 69.73 |
| 长春 | 70.58 | 重庆 | 64.89 | 宁波 | 46.61 |
| 沈阳 | 75.56 | 成都 | 89.85 | 衢州 | 72.11 |
| 呼和浩特 | 64.48 | 昆明 | 38.40 | 厦门 | 32.63 |
| 乌鲁木齐 | 93.56 | 贵阳 | 50.94 | 绍兴 | 69.48 |
| 西宁 | 67.43 | 长沙 | 82.13 | 深圳 | 39.63 |
| 银川 | 46.60 | 武汉 | 92.88 | 沈阳 | 75.36 |
| 兰州 | 68.68 | 南宁 | 55.12 | 苏州 | 66.01 |
| 西安 | 106.99 | 南昌 | 68.90 | 台州 | 54.61 |
| 太原 | 77.52 | 福州 | 34.57 | 泰州 | 84.21 |
| 济南 | 116.42 | 海口 | 27.05 | 温州 | 59.89 |
| 郑州 | 108.25 | 合肥 | 87.04 | 无锡 | 71.20 |
| 保定 | 112.07 | 拉萨 | 25.22 | 宿迁 | 62.23 |
| 沧州 | 85.89 | 常州 | 69.72 | 徐州 | 75.83 |
| 承德 | 52.32 | 东莞 | 46.74 | 盐城 | 67.77 |
| 邯郸 | 117.93 | 佛山 | 51.94 | 扬州 | 68.49 |
| 衡水 | 118.14 | 湖州 | 80.99 | 肇庆 | 54.24 |
| 廊坊 | 109.25 | 淮安 | 73.21 | 镇江 | 67.99 |
| 秦皇岛 | 60.40 | 惠州 | 34.27 | 中山 | 48.25 |
| 唐山 | 113.09 | 嘉兴 | 72.22 | 舟山 | 34.57 |
| 邢台 | 148.92 | 江门 | 47.74 | 珠海 | 38.35 |
| 张家口 | 40.78 | 金华 | 73.43 | | |

北方省会城市或直辖市　　南方省会城市或直辖市

北方非省会城市　　南方非省会城市

## 1.2 部分城市近年 $PM_{2.5}$ 浓度的变化趋势

在新版《环境空气质量标准》发布前，中国仅有少数城市对 $PM_{2.5}$ 浓度进行官方的试点监测，其余城市的 $PM_{2.5}$ 污染资料多来自于科研实验站点的监测数据，以及利用卫星搭载设备测定气溶胶光学厚度，再通过数学模型模拟所得。目前，上海、天津、南京、广州市环保局均已公布了本市 $PM_{2.5}$ 试点监测的历史数据。数据显示，上海 2006~2010 年的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度在 0.044mg/m$^3$~0.053mg/m$^3$ 之间；天津市 2008~2011 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度范围为 0.050mg/m$^3$~0.061mg/m$^3$，年际变化趋势为基本持平；南京市 2008~2010 年 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 63μg/m$^3$，年平均值呈上升趋势；广东城区 3 个监测点 2006~2011 年的 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 37~47μg/m$^3$，呈逐年下降趋势，2010 年比 2006 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度下降 8%~28%。在 2012 年新版《环境空气质量标准》发布后，上海和广州两市环保局率先在《环境状况公报中》公布了 2012 年 $PM_{2.5}$ 的监测数据，自 2012 年 6 月 27 日至 12 月 31 日，上海市 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 48μg/m$^3$，与 2006~2010 年历史浓度基本持平；广州市统计得到 2012 年全年 $PM_{2.5}$ 浓度值为 51μg/m$^3$，较历史数据略有升高。结合表 1 中各城市 2013 年 $PM_{2.5}$ 的年均值不难发现，上海、天津、南京、广州四市 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度皆创近年来新高，显示其大气 PM2.5 的污染程度仍在增加。

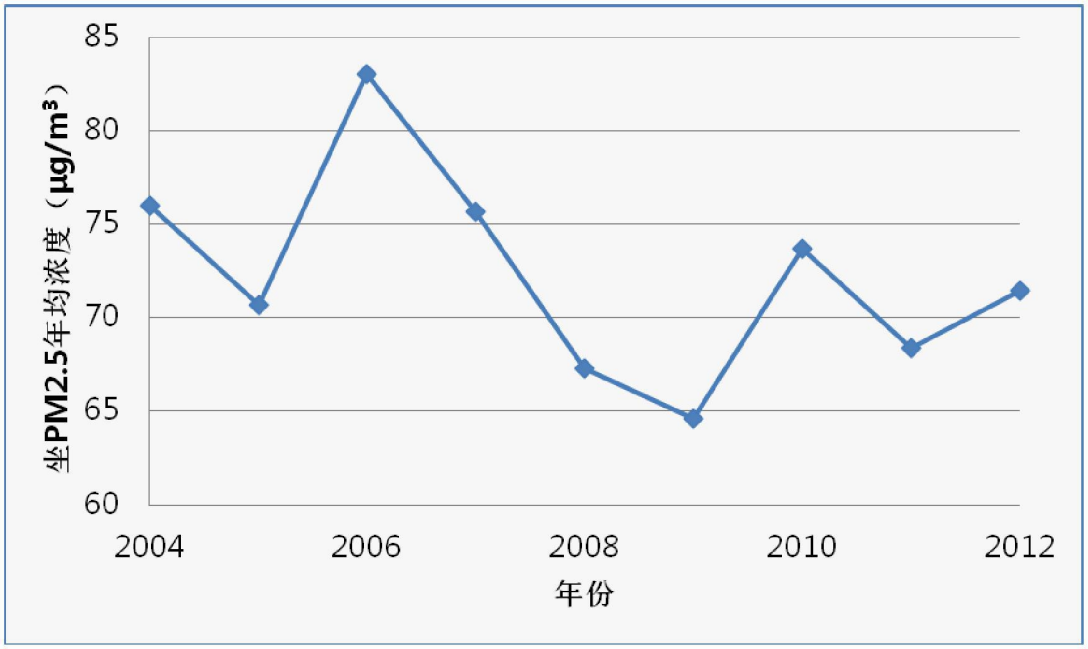
Liu 等[1]在对北京市大气颗粒物季节变化及日间变化的研究中，在北京市大气物理研究所设立大气颗粒物监测点，对北京市 2004~2012 年 $PM_{2.5}$ 浓度进行了连续监测。该监测结果显示（表 2 和图 1），北京 2004~2012 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度在 64.6μg/m$^3$~83.1μg/m$^3$ 之间，均超过国家空气质量二级标准的浓度限值；9 年间 $PM_{2.5}$ 的年均浓度呈轻微的下降趋势。在《北京市 2013 年环境状况公报》中，北京市环保局公布 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度的监测结果为 89.5μg/m$^3$，超出国家二级标准的浓度限值 1.56 倍，其中南部平原区区域点水平明显高于北部区域点。全市区多监测点的监测结果更客观地反映了北京市 $PM_{2.5}$ 的污染水平，但单监测点的长期监测对了解 $PM_{2.5}$ 浓度的时间趋势方面仍具有很高的参考价值。

表 2 北京 2004-2012 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度

| 年份 | $PM_{2.5}$ 年均浓度（μg/m$^3$） | 年份 | $PM_{2.5}$ 年均浓度（μg/m$^3$） |
|---|---|---|---|
| 2004 | 76.0 | 2009 | 64.6 |
| 2005 | 70.7 | 2010 | 73.7 |
| 2006 | 83.1 | 2011 | 68.4 |
| 2007 | 75.7 | 2012 | 71.5 |
| 2008 | 67.3 | | |

Liu Z et al., Environmental Science and Pollution Research, 2014

图 1 北京 2004-2012 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度




Liu Z et al., Environmental Science and Pollution Research, 2014

### 1.3 中国的空气质量标准与世界卫生组织空气质量准则对比

中国不同地区的空气污染特征、经济发展水平和环境管理要求差异较大，2012 年最新修订的《环境空气质量标准》（GB3095-2012）增加了对 $PM_{2.5}$ 的浓度限值进行了规定。这一限值与世界卫生组织（WHO）的空气质量准则进行比较，这一限值的设置已逐渐与世界标准接轨，二级限值适用于居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区，对 $PM_{2.5}$ 的限值对应世界卫生组织的过渡阶段一准则值。根据世界卫生组织对年均颗粒物空气质量准则值的制定依据解释，在超过空气质量准则值水平下长期暴露，死亡率、心肺疾病死亡率等会明显增加，当长期暴露于过渡阶段一准则值浓度下时，死亡风险会增加 15%。

表 3 中国的空气质量标准与世界卫生组织空气质量准则对比

| 标准名称 | 取值时间 | $PM_{2.5}$（μg/m³） |
|---|---|---|
| 世界卫生组织（WHO）的空气质量准则值 | 年平均 | 10 |
| | 24 小时平均 | 25 |
| 中国《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级浓度限值 | 年平均 | 35 |
| | 24 小时平均 | 75 |

潘小川等，《危险的呼吸：$PM_{2.5}$ 的健康危害和经济损失评估研究》，2012

## 1.4 大气污染防治行动计划出台后的各个主要城市2017年细颗粒物（$PM_{2.5}$）改善目标

2013年9月，《大气污染防治行动计划》颁布，其中提出到2017年，全国地级及以上城市可吸入颗粒物（$PM_{10}$）浓度比2012年下降10%以上，优良天数逐年提高；京津冀、长三角、珠三角等区域细颗粒物（$PM_{2.5}$）浓度分别下降25%、20%、15%左右，其中北京市细颗粒物年均浓度控制在60μg/m$^3$左右。之后各个主要城市也纷纷提出了自己2017年的$PM_{2.5}$浓度下降目标，详见表4。

表 4　31 个省会城市和直辖市 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标

| 城市 | 省份 | 2017 年浓度下降目标 $PM_{2.5}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 下降比例(%)或目标浓度($\mu g/m^3$) | 基准年 | 目标来源文件 | 基准年浓度($\mu g/m^3$)* | 目标浓度($\mu g/m^3$) |
| 北京 | 北京 | 60$\mu g/m^3$ 左右 | —— | 《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》 | 92.91 | 60.0 |
| 天津 | 天津 | 25% | 2012 | 《天津市清新空气行动方案》 | 94.46 | 70.8 |
| 石家庄 | 河北 | 33% | 2012 | 《石家庄市大气污染防治攻坚行动方案 2013-2017》 | 137.02 | 91.8 |
| 上海 | 上海 | 20% | 2012 | 《上海市清洁空气行动计划 2013-2017》 | 64.70 | 51.8 |
| 南京 | 江苏 | 20% | 2012 | 《江苏省大气污染防治行动计划实施方案》 | 77.33 | 61.9 |
| 杭州 | 浙江 | 26% | 2013 | 《杭州市大气污染防治行动计划(2014—2017 年)》 | 67.96 | 50.3 |
| 广州 | 广东 | 20% | 2013 | 《广东省大气污染防治行动方案（2014—2017 年）》 | 48.43 | 38.7 |
| 济南** | 山东 | 20% | 2012 | 《山东省大气污染防治目标责任书 2013》 | 116.42 | 93.1 |
| 太原** | 山西 | 20% | 2012 | 《山西省落实大气污染防治行动计划实施方案》 | 77.52 | 62.0 |
| 呼和浩特 | 内蒙古 | 10% | 2012 | 《内蒙古自治区人民政府关于贯彻落实大气污染防治行动计划的意见》 | 64.48 | 58.0 |
| 成都 | 四川 | 20% | 2013 | 《四川省大气污染防治行动计划实施细则》 | 89.85 | 71.9 |
| 合肥 | 安徽 | 20% | 2012 | 《合肥市环境空气质量阶段性达标工作方案》 | 87.04 | 69.6 |
| 武汉 | 湖北 | 下降 20%，控制在 75$\mu g/m^3$ 以内 | 2013 | 《武汉市城市环境空气质量达标规划（2013—2027 年）》 | 92.88 | 75.0 |
| 郑州 | 河南 | 15% | 2012 | 《河南省蓝天工程行动计划》 | 108.25 | 92.0 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 西安 | 陕西 | 10% | 2012 | 《陕西省“治污降霾·保卫蓝天”五年行动计划（2013—2017 年）》 | 106.99 | 96.3 |
| 哈尔滨 | 黑龙江 | 8% | 2013 | 《哈尔滨市清洁空气五年行动计划》 | 79.26 | 72.9 |
| 重庆 | 重庆 | 16% | 2012 | 《重庆市人民政府关于贯彻落实大气污染防治行动计划的实施意见》 | 64.89 | 54.5 |
| 贵阳 | 贵州 | 7% | 2013 | 《贵州省大气污染防治行动计划实施方案》 | 50.94 | 47.4 |
| 兰州 | 甘肃 | 5% | 2012 | 《甘肃省人民政府关于贯彻落实国务院大气污染防治行动计划的实施意见》 | 68.68 | 65.2 |
| 长沙 | 湖南 | 71μg/m$^3$ | —— | 《长沙市大气污染防治行动计划实施方案》 | 82.13 | 71.0 |
| 沈阳 | 辽宁 | 暂无目标值 | —— | 《辽宁省大气污染防治行动计划实施方案》 | 75.36 | 暂无目标值 |
| 长春 | 吉林 | 年均浓度逐年下降 | —— | 《长春市大气污染防治行动计划实施方案》 | 70.58 | 年均浓度逐渐下降 |
| 银川 | 宁夏 | 年均浓度逐年下降 | —— | 《宁夏回族自治区大气污染防治行动计划 （2013 年—2017 年）》 | 46.60 | 年均浓度逐渐下降 |
| 西宁 | 青海 | 暂无目标值 | —— | 《青海省大气污染防治目标责任书 2013》、《以西宁市为重点的东部城市群大气污染防治实施意见》 | 67.43 | 暂无目标值 |
| 乌鲁木齐 | 新疆 | 暂无目标值 | —— | 《新疆维吾尔自治区大气污染防治目标责任书 2013》 | 93.56 | 暂无目标值 |
| 南昌 | 江西 | 50μg/m$^3$ | —— | 《江西省大气污染防治行动计划实施细则》 | 68.90 | 50.0 |
| 福州 | 福建 | 暂无目标值 | —— | 《福建省大气污染防治行动计划实施细则 | 34.57 | 暂无目标值 |
| 南宁 | 广西 | 暂无目标值 | —— | 《南宁市大气污染防治三年行动方案（2014-2016）》 | 55.12 | 暂无目标值 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 海口 | 海南 | 相对 2013 年保持不变 | 2013 | 《海南省大气污染防治行动计划实施细则》 | 27.05 | 27.1 |
| 昆明 | 云南 | 暂无目标值 | —— | 《昆明市大气污染防治行动计划实施细则》 | 38.40 | 暂无目标值 |
| 拉萨 | 西藏 | 不超过 2013 年的值 | 2013 | 《西藏大气污染防治行动计划实施细则》 | 25.22 | 25.2 |

*由于全国各城市在 2012 年尚未开展 $PM_{2.5}$ 监测工作，没有 2012 年的年均 $PM_{2.5}$ 数值，因此在计算各城市 2017 年 $PM_{2.5}$ 目标值时均采用 2013 年的年均水平作为基准值。

**济南、太原的 $PM_{2.5}$ 下降比例为全省目标。

## 2. 前期的研究

2012 年，绿色和平委托北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系开展研究，对北京、上海、广州、西安四座中国城市中，$PM_{2.5}$ 对居民造成的公众健康危害和经济损失进行了初步估算，发表了报告《危险的呼吸：$PM_{2.5}$ 的健康危害和经济损失评估研究》（以下简称“报告”）。该报告是国内第一份在不同城市特点基础上，分析 $PM_{2.5}$ 造成健康危害和经济损失的研究报告。

### 2.1 报告主要研究结果

报告里指出，在北京、上海、广州、西安四座城市，$PM_{2.5}$ 日均浓度的上升对居民健康有害，会造成居民非意外总死亡率和呼吸、循环系统疾病死亡率的上升。报告中引述的 $PM_{2.5}$ 日均浓度值与居民死亡率间的暴露反应关系详见表 5。

在 2010 年（研究所选用的基线年），北京市因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）暴露健康危害造成的超额死亡人数为 2 349 人，占当年总死亡人数的 1.9%，由此对北京市造成的健康经济损失近 18.6 亿元人民币；上海市因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）暴露健康危害造成的超额死亡人数为 2 980 人，占当年总死亡人数的 1.6%，对上海市造成的健康经济损失近 23.7 亿元人民币；广州市因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）暴露健康危害造成的超额死亡人数为 1 715 人，占当年总死亡人数的 2.2%，对广州市造成的健康经济损失近 13.6 亿元人民币；西安市因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）暴露健康危害造成的超额死亡人数为 726 人，占当年总死亡人数的 1.6%，对西安市造成的健康经济损失约 5.8 亿元人民币。

至 2012 年（研究所选用的情景年），若采取有效节能减排措施，使得 $PM_{2.5}$ 的日均浓度值能下降到我国《国家空气质量标准（GB3095-2012）》（2012 年最新修订）中所规定的二级和一级浓度限值，即 $PM_{2.5}$ 日平均浓度为 75 和 35 均浓 / $m^3$；甚至，若节能减排措施卓有成效，使得 $PM_{2.5}$ 日均浓度值已能下降至 WHO 空气质量准则值 10 质量 / $m^3$：则在北京市，因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）暴露相应造成的超额死亡人数将分别减少 1 341，2 054 和 2 233 人，相应的经济收益将达到约 11，16 和 18 亿元（人民币，下同）；在上海市，因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）暴露相应造成的死亡人数将分别减少 867、2 267 和 2 617 人，相应的经济收益将达到近 6.9、18 和 21 亿元； 在广州市，因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）

表 5 四城市颗粒物的暴露反应关系系数（RR 值后括号内的数字为 95%可信区间）

| 城市 | 健康结局 | $PM_{2.5}$日均浓度值（μμ $^3$）和标准差 | $PM_{2.5}$日均浓度值每升高10浓度值每$^3$，死亡率的相对危险度（RR） |
|---|---|---|---|
| 北京 | 非意外死亡 | 83.96（58.28） | 1.002709 ( 1.000982 , 1.004438 ) |
| | 循环系统疾病死亡 | | 1.003465 ( 1.001034 , 1.005903 ) |
| 广州 | 非意外死亡 | 59.91（32.57） | 1.005648 ( 1.002182 , 1.009125 ) |
| | 循环疾病死亡 | | 1.008009 (1.002098 , 1.013955 ) |
| | 呼吸系统疾病死亡 | | 1.00867 ( 1.001341 , 1.016052 ) |
| 上海 | 非意外死亡 | 56.4（1.34） | 1.0036（1.0011,1.0061） |
| | 循环系统疾病死亡 | | 1.0041（1.0001,1.0082） |
| | 呼吸系统疾病死亡 | | 1.0095（0.0016,0.0173） |
| 西安 | 非意外死亡 | 176.7（103.8） | 1.002（1.0007，1.0033） |
| | 循环系统疾病死亡 | | 1.0027（1.0008,1.0046） |

潘小川等，《危险的呼吸：$PM_{2.5}$的健康危害和经济损失评估研究》，2012

暴露相应造成的死亡人数将分别减少 321、1 238 和 1 468 人，相应的经济收益将达到近 2.5、9.8 和 12 亿元；在西安市，因 $PM_{2.5}$ 短期（急性）暴露相应造成的死亡人数将分别减少 407、597 和 644 人，相应的经济收益将达到近 3.2、4.7 和 5.1 亿元。在四城市中，$PM_{2.5}$ 污染治理达到健康收益最明显的是西安市，经济收益最大的将是上海市。

前述的研究首次提出，目前中国部分大城市的大气 $PM_{2.5}$ 污染已经对暴露人群的健康造成了实际的不良影响并产生了相应的经济损失。

## 2.2 报告主要局限性

如前所述，包含了 $PM_{2.5}$ 和臭氧 8 小时浓度限值的新版《环境空气质量标准》在 2012 年 2 月才修订完成，中国各城市自 2012 年底才开始开展 $PM_{2.5}$ 浓度的连续常规监测。因此，《危险的呼吸：$PM_{2.5}$ 的健康危害和经济损失评估研究》报告团队只能从 2012 年以前出于科学研究等目的设立有 $PM_{2.5}$ 监测点的城市中，选取四个开展研究，报告所覆盖的城市数量尚非常少，代表性和权威性均显不足。

另外，该报告主要基于当时国内时间序列分析研的究成果以及现有数据的限制，没有做长期暴露的健康效应分析和评估，这会大大低估空气污染对于人群死亡的影响。因为根据国外学者的研究报告和经验，大气颗粒物的人群长期暴露健康效应大约是其短期健康效应的 8-10 倍。

## 2.3 $PM_{2.5}$ 长期暴露的健康效应综述

与 $PM_{10}$ 或粒径更大的颗粒物相比，$PM_{2.5}$ 的比表面积较大，易于富集空气中各种有毒重金属、酸性氧化物、有机污染物等多种化学物质以及细菌和病毒等微生物，并使毒性物质的溶解和反应速度加快。$PM_{2.5}$ 不易被鼻腔内绒毛、咽喉阻挡，能通过呼吸系统被直接吸入，沉积到肺泡，甚至可以通过肺的内呼吸进入血液从而到达体内其他器官，导致人体多系统和组织结构的损害。国内外多项研究表明，$PM_{2.5}$ 的短期或长期暴露均会对人体产生不良的健康效应，主要表现为呼吸系统和心脑血管系统疾病的急诊和住院率增加、肺功能和免疫功能下降、肺癌等恶性肿瘤的患病风险升高、心肺疾病患者的过早死亡等。2012 年世界卫生组织（WHO）发布的《2010 年全球疾病负担评估》指出，在导致全球过早死亡的 67 种主要风险因子中，大气 $PM_{2.5}$ 污染位居第 7，而在中国位居第 4，仅次于不良饮食习惯、高血压和吸烟；大气 $PM_{2.5}$ 污染每年造成全世界逾 320 万人过早死亡，其中约有 120 万发生在中国。除此之外，国内外也有许多关于 $PM_{2.5}$ 影响内分泌功能、诱发不良妊娠结局等方面的报道。某些特定人群，如老人、糖尿病或心肺疾病患者，对 $PM_{2.5}$ 造成健康损害的易感性较一般人群更强[2]。

### 2.3.1 $PM_{2.5}$ 对心血管系统的影响

$PM_{2.5}$ 可以通过引起全身性炎症反应、破坏交感和副交感神经的平衡，以及

进入血液循环而直接作用于内皮细胞和血小板等多种途径影响心血管系统的正常功能[3]。Jorgensen 等[4]利用肱动脉超声对 3040 名研究对象的血流介导的血管扩张功能（FMD）进行测量，以探究长期 $PM_{2.5}$ 暴露对血管内皮功能的影响。研究发现，$PM_{2.5}$ 年平均浓度每升高 3μg/m$^3$，会造成 FMD 下降 0.3%（95%可信区间:-0.6%,-0.03%,P=0.03）；在女性、非吸烟者、年轻人及高血压患者中，$PM_{2.5}$ 与 FMD 的关联性更强，而异常的 FMD 则是心血管事件发生的良好预测指标。

2004 年，美国心脏病协会认定，暴露于高浓度的 $PM_{2.5}$ 与心肌梗死、脑卒中、心力衰竭、心律失常等多种心血管疾病的临床表现相关[5]。近年来，越来越多的研究为此种关联提供了流行病学依据。2007 年，Miller 等[6]对美国 36 个大城市的 65893 名绝经后妇女平均 6 年的随访研究表明，在 3.4-28.3μg/m$^3$ 浓度范围内，$PM_{2.5}$ 每升高 10μg/m$^3$，发生心血管事件的风险增加 24%（RR:1.24, 95%可信区间:1.09-1.41），发生脑血管事件的风险增加 35%（RR:1.35, 95%可信区间:1.08-1.68）。Madrigano 等[7]在伍斯特心脏病研究的基础上开展了一项病例对照研究，纳入了在 1995-2003 年间确诊的 4467 例急性心肌梗死病例，并利用卫星气溶胶光学厚度（AOD）反演得到区域水平（10×10km）的 $PM_{2.5}$ 暴露情况。该研究发现，区域 $PM_{2.5}$ 浓度升高四分位数间距（0.59μg/m$^3$），相应人群发生急性心肌梗死的风险增加 16%（95%可信区间:1.04-1.29）。此外，$PM_{2.5}$ 污染还可能是高血压发病的危险因素。Fuks 等[8]分析了 4291 名 45-75 岁德国城市居民健康状况的横断面数据，探讨 $PM_{2.5}$ 长期暴露与动脉血压的相关性，结果显示居住地区 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度每升高 2.4μg/m$^3$，调查对象的平均收缩压和舒张压分别升高 1.4mmHg（95%可信区间:0.5-2.3）和 0.9mmHg（95%可信区间:0.4-1.4）。台湾一项针对 54 岁及以上老年人的研究也发现，在控制了潜在混杂因素的影响后，$PM_{2.5}$ 年平均浓度的增加会导致血压及血清总胆固醇水平的升高[9]。

长期暴露于 $PM_{2.5}$ 还会增加心血管疾病死亡的风险，该结论在美国哈佛六城市研究中被首次提出。1976 年流行病学家在哈佛等六城市进行的队列研究，对 8111 名成年人随访了 14 至 16 年，结果显示，大气 $PM_{2.5}$ 浓度最高（29.6μg/m$^3$）的城市与最低（11.0μg/m$^3$）的城市相比，其居民校正后的总体死亡相对危险度为 1.26（95%可信区间:1.08-1.47），其中，心肺疾病死亡的相对危险度为 1.37（95%可信区间:1.11-1.68）[10]。Pope 等[11]对美国 50 个州近 50 万成年人的死亡数据分析后发现，在控制年龄、性别、吸烟、饮食、职业暴露等混杂因素后，$PM_{2.5}$ 年平均浓度每升高 10μg/m$^3$，心肺疾病死亡率增加 6%（RR:1.06, 95%可信区间:1.03-1.16），且未发现 $PM_{2.5}$ 产生不良健康效应的阈值。加拿大的一项队列研究也显示，长期暴露于较低浓度的 $PM_{2.5}$（均值:8.7μg/m$^3$，四分位间距:6.2μg/m$^3$）仍会使心血管疾病死亡的风险增加[12]。对美国 36 个大城市绝经后妇女的研究表明，大气 $PM_{2.5}$ 浓度每升高 10μg/m$^3$，心血管疾病死亡的风险增加 76%（95%可信区间:25%-147%）[6]。结合以往的研究结果，该研究提示绝经后女性对 $PM_{2.5}$ 污染引起的心血管系统效应更为敏感。

### 2.3.2 $PM_{2.5}$ 对呼吸系统的影响

$PM_{2.5}$ 主要通过炎症反应和氧化应激对肺部造成损害，导致肺功能下降、呼吸系统疾病的发病率和死亡率增加等健康结局。

Gauderman 等[13]对美国南加州 12 个社区的 1759 名儿童进行了 8 年的随访研究，每年测定受试者的肺功能，并以社区为单位评价其 $PM_{2.5}$ 的暴露情况。研究显示，$PM_{2.5}$ 可对 10-18 岁儿童的肺功能发育造成不良影响（P=0.04），暴露于高浓度 $PM_{2.5}$ 的儿童在 18 岁时出现一秒用力呼气容积（FEV1）偏低的比例是暴露于低浓度 $PM_{2.5}$ 儿童的 4.9 倍。此外，高浓度 $PM_{2.5}$ 还会削弱肺功能良好对哮喘发生的保护作用，使儿童对新发哮喘的易感性增加[14]。Young 等[15]对美国成年女性的研究发现，$PM_{2.5}$ 浓度每升高 3.6μg/m$^3$，哮喘发病的校正比值比为 1.20（95%可信区间:0.99-1.46,P=0.063），出现喘息症状的校正比值比为 1.14（95%可信区间:1.04-1.26,P=0.008）。在发展中国家，炊用燃料的燃烧会造成室内 $PM_{2.5}$ 浓度升高。一项在印度农村地区开展的研究表明，室内因燃料燃烧产生的 $PM_{2.5}$，其浓度与慢性阻塞性肺病和小气道阻塞的患病率均呈正相关[16]。

与一般人群相比，老年人及慢性阻塞性肺病（COPD）等慢性基础疾病患者对 $PM_{2.5}$ 的敏感性更高。有研究显示，长期暴露于 $PM_{2.5}$ 不仅会使老年人出现肺功能下降，还能增加其因患社区获得性肺炎而住院的风险[17]。Kaji 等[18]在 COPD 患者中进一步探究了遗传性过敏症对 $PM_{2.5}$ 易感性的影响，发现 $PM_{2.5}$ 浓度升高 10μg/m$^3$，会导致特应性个体出现呼吸困难、气喘、咳嗽等呼吸道症状，以及使用急救药物的风险增加；而在非特应性 COPD 患者中，未观察到 $PM_{2.5}$ 与以上健康结局的关联，提示遗传性过敏症会提高 COPD 患者对 $PM_{2.5}$ 的易感性。

$PM_{2.5}$ 是多种有害物质的载体，其中包括一些致癌性成分如多环芳烃（PAHs），可能会导致肺癌发生与死亡的风险增加。$PM_{2.5}$ 污染与肺癌死亡相关性的流行病学证据主要来自美国哈佛六城市研究（HSC）和美国癌症协会开展的癌症预防研究-II（CPS-II）。Lepeule 等[19]根据 HSC 随访至 2009 年的资料，分析了 $PM_{2.5}$ 对人群肺癌死亡率的影响，结果显示 $PM_{2.5}$ 浓度每升高 10μg/m$^3$，校正后的肺癌死亡相对危险度为 1.37（95%可信区间:1.07-1.75）。CPS-II 对 120 万名成年人的随访研究同样发现，$PM_{2.5}$ 浓度每升高 10μg/m$^3$，校正后的肺癌死亡相对危险度为 1.14（95%可信区间:1.04-1.23）[20]。Turner 等[21]对 CPS-II 中 188699 名终生未吸烟者的健康数据进行了进一步的分析，结果表明 $PM_{2.5}$ 平均浓度每升高 10μg/m$^3$，非吸烟者肺癌死亡的风险增加 19%（RR=1.19, 95%可信区间:0.97-1.47），高于一般人群；且在有慢性肺部疾病病史的对象中，此种关联强度更强。除以上两个经典的研究外，日本、意大利等国开展的队列研究也都得到了相似的结论[22,23]。

### 2.3.3 $PM_{2.5}$ 对妊娠结局的影响

新生儿的出生结局不仅直接决定婴幼儿的身体状况，而且对其成年后的健康也有远期的影响。因此，许多学者开展了$PM_{2.5}$与妊娠结局的流行病学调查，关注的不良妊娠结局主要包括低出生体重、早产等。$PM_{2.5}$在不同的暴露时期、暴露浓度下，对妊娠结局的影响也不尽相同。Kloog 等[24]对马萨诸塞州 2000-2008 年期间的$PM_{2.5}$水平和新生儿出生体重的关联性进行评估，发现出生体重与整个孕期$PM_{2.5}$的暴露水平呈负相关，在控制了其他混杂因素后，$PM_{2.5}$浓度每升高 10μg/$m^3$，出生体重下降 13.80g（95%可信区间:-21.10,-6.05）。Ha 等[25]研究了不同孕期$PM_{2.5}$暴露对妊娠结局的影响，结果表明孕早、中、晚期的$PM_{2.5}$暴露均会增加不良妊娠结局发生的风险，其中孕中期$PM_{2.5}$暴露的影响作用最强，$PM_{2.5}$浓度每升高一个四分位间距（2.6μg/$m^3$），发生低出生体重、早产、极度早产的风险分别提高 3%（95%可信区间:1-6%）、12%（11-14%）、22%（18-25%）。Wilhelm 等[26]对美国洛杉矶 994832 例新生儿的回顾性队列研究显示,在分娩前 6 周,当$PM_{2.5}$暴露浓度高于 24.3μg/$m^3$时,早产的风险增加 19%（RR:1.19, 95%可信区间:1.02-1.40）。Huynh 等[27]对美国加州 10673 例早产儿病例对照研究显示,在调整了其他混杂因素,孕首月暴露于$PM_{2.5}$，发生早产的风险增加 21%（RR:1.21, 95%可信区间:1.12-1.30）；在分娩的前两周暴露于$PM_{2.5}$，发生早产的风险增加 17%（RR:1.17, 95%可信区间:1.09-1.27）。

### 2.3.4 $PM_{2.5}$对内分泌系统的影响

动物实验已证实，长期暴露于$PM_{2.5}$的小鼠会出现胰岛素抵抗和糖耐量受损，提示大气颗粒物可能是 2 型糖尿病发病的危险因素[28]。一项针对居住在洛杉矶黑人妇女的队列研究表明，$PM_{2.5}$浓度每升高 10μg/$m^3$，2 型糖尿病的发病率比率为 1.63（95%可信区间:0.78-3.44）[29]。Brook 等[30]分析了加拿大 1991-2001 年人口死亡数据,结果显示$PM_{2.5}$每升高 10μg/$m^3$,糖尿病相关死亡的风险比为 1.49（95%可信区间:1.37-1.62）。值得注意的是，加拿大人口的 $PM_{2.5}$ 平均暴露水平较低（8.7μg/$m^3$），该研究为低水平$PM_{2.5}$的健康效应提供了良好的流行病学依据。

### 2.3.5 $PM_{2.5}$对皮肤健康的影响

$PM_{2.5}$表面富集的高脂溶性有机化合物如多环芳烃（PAHs），易被皮肤吸收而损害皮肤健康。体外实验显示，颗粒物能够增加角质形成细胞内芳香烃受体的表达,该受体可进一步诱导角质形成细胞和黑色素细胞中皱纹和色素斑形成相关基因的转录[31,32]。$PM_{2.5}$对皮肤健康影响的流行病学研究尚处于起步阶段，Vierkötter 等[33]对 400 名白人妇女的调查,最早提出了长期暴露于大气颗粒物与皮肤过早老化相关，尤其是色素斑的形成。国内的两项队列研究同样发现，炊用化石燃料的燃烧造成的室内空气污染与皮肤皱纹发展的相关性具有统计学意义[34,35]。此外，大气颗粒物污染还可增加皮肤疾病的发病风险[36]。Kim 等[37]对韩国 22 名特应性皮炎患者开展的随访研究结果表明,特应性皮炎患者湿疹症状出现的频率随大气颗粒物浓度的升高而增加。

# 二． 目的

虽然目前国内开展 $PM_{2.5}$ 浓度的连续常规监测仅 1-2 年，在全国水平上尚不具有足够的数据量进行回顾性队列研究以探讨 $PM_{2.5}$ 对于健康的长期影响，但是我们仍然希望在现有数据的基础上，对中国大气 $PM_{2.5}$ 的长期健康危害开展初步的探讨和人群健康损失的定量评价。本研究目的是基于 2013 年中国重点城市年平均 $PM_{2.5}$ 浓度与居民年主要病因别死亡率等可收集的数据，定量评估长期暴露于 2013 年浓度值水平的 $PM_{2.5}$ 污染对研究城市暴露人群健康的不良影响，和不同 $PM_{2.5}$ 浓度降低情景下预期产生的人群健康效益。

# 三． 方法

## 1. 研究思路概述

本研究关注的时间段为 2013 年，关注的地区为中国 31 个省会城市或直辖市，城市的名称可详见表 1。我们以各城市 2013 年底的居民缺血性心脏病(ICD-10 编码：I20-I25)、脑血管病(I60-I69)、肺癌(C33-C34)、慢性阻塞性肺疾病(COPD，J40-J44)四种疾病造成病因别死亡率作为人群健康水平的代表。

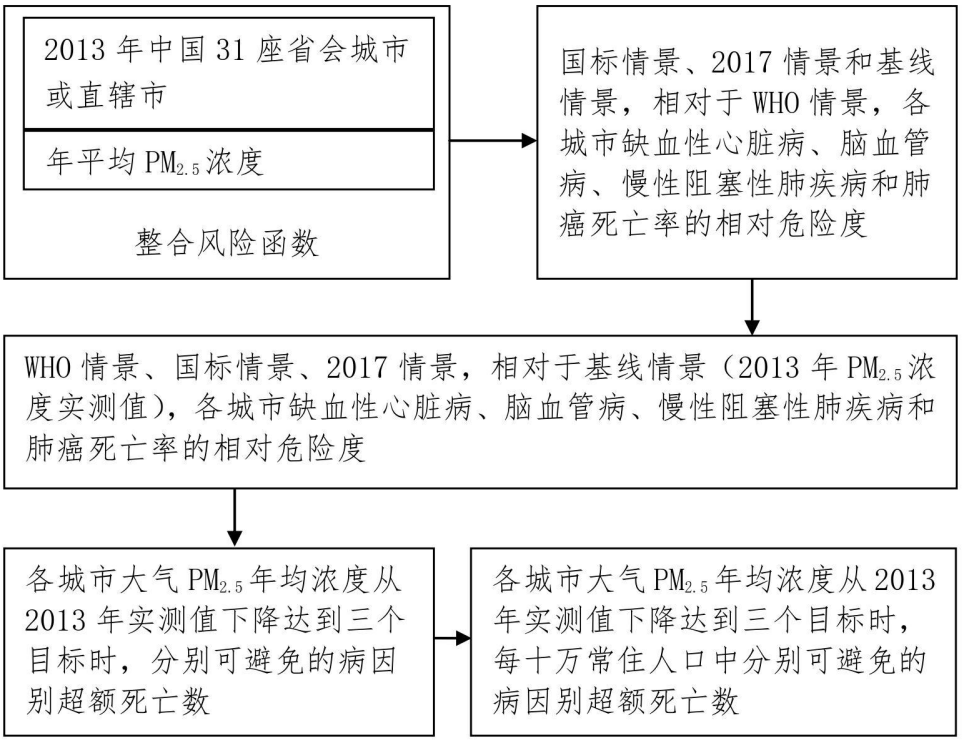
研究获得了各城市 2013 年年平均 $PM_{2.5}$ 浓度数据(**基线情景**)，选取了三个“情景目标”，分别为大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从 2013 年实测值下降达到城市 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标值（**2017 情景**），达到中国《环境空气质量标准》（GB3095-2012）二级浓度限值 35μg / $m^3$（**国标情景**），及达到世界卫生组织（WHO）空气质量准则值 10μg / $m^3$（**WHO 情景**）。根据世界卫生组织对年均颗粒物空气质量准则值的制定依据解释，在超过空气质量准则值水平下长期暴露，死亡率、心肺疾病死亡率等会明显增加，换言之，即可认为长期暴露于 WHO 情景下造成超额死亡可忽略。而长期暴露于国标情景、2017 情景和基线情景下均会造成一定的超额死亡。我们想要估算，31 个省会城市或直辖市的大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从基线情景下降达到三个目标情景时，分别可避免的病因别超额死亡数。

首先，我们以 WHO 情景为本底（超额死亡可忽略），采用细颗粒物暴露造成的全球疾病负担估算中所采用的“整合风险函数”方法（Integrated Exposure-Response，IER）计算国标情景、2017 情景和基线情景下，相对于本底

即 WHO 情景，各城市缺血性心脏病、脑血管病、慢性阻塞性肺疾病和肺癌死亡率的相对危险度。之后，我们将基线情景下的上述四种病因别死亡率（即 31 个省会城市或直辖市 2013 年上述四种疾病的实际病因别死亡率）设定为 RR=1，先根据上述计算出的基线情景相对于 WHO 情景的相对危险度，反推出 WHO 情景相对于基线情景上述四种病因别死亡率的相对危险度，进而根据上述计算出的 2017 情景和国标情景相对于 WHO 情景的相对危险度，推算出 2017 情景和国标情景相对于基线情景的相对危险度。据此，结合各城市 2013 年的常住人口数，我们可计算各城市大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从 2013 年实测值分别下降达到 2017 情景、国标情景和 WHO 情景三个目标后，分别可避免的上述四种病因别的超额死亡数，及每十万常住人口中分别可避免的上述四种病因别的超额死亡人数。

研究方法流程图请见图 2。

图 2 研究方法流程图




## 2. 整合风险函数

首先需要说明的一点是，中国 31 个省会城市或直辖市 2013 年底的居民非意外总死亡率来自国家统计局编纂的《2014 中国统计年鉴》或各省统计局编纂的 2014 省级统计年鉴，但在这些统计年鉴里并没有我们所关注的病因别死亡率的信息。在本研究中，采用的最新的病因别死亡率资料，是来自于中国疾病预防控制中心慢性非传染性疾病预防控制中心监制出版的《全国疾病监测系统死因监测数据集（2012）》。从这本数据集中，我们获取了 2012 年我国东部省份、中部省

份和西部省份城市居民的非意外总死亡率和病因别死亡率。假定 2013 年与 2012 年相比，各病因别死亡率占非意外总死亡率的比例不变，由此推算出 2013 年各个城市的病因别死亡率。详见表 6 和表 7。

根据项目合作方绿色和平委托「全国空气质量指数」提供的中国 31 个省会城市或直辖市 2013 年每个监测站点每天的 $PM_{2.5}$ 浓度值数据，我们计算了每个城市所有监测站点每天的 $PM_{2.5}$ 浓度算术平均值作为该城市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度值。由于监测站点所处的地理位置不同，理论上，应当考虑每个监测站点所辐射的范围内的居民数量，进行人口加权后再取平均，是更加科学和贴近实际的计算 $PM_{2.5}$ 年平均浓度值的算法。遗憾的是，在本研究中，我们暂时无法获取每个监测站点所在的城区的详细人口数值，故无法进行人口加权，暂时使用算术平均值替代。具体数值请见表 1。

表 6 中国东、中、西部省份 2012 年四种病因别死亡率占非意外总死亡率的比例

| | 包含省会城市或直辖市 | 2012 年非意外总死亡率(‰) | 2012 年缺血性心脏病死亡率(‰)和占比 | 2012 年脑血管病死亡率(‰)和占比 | 2012 年肺癌死亡率(‰)和占比 | 2012 年慢性阻塞性肺疾病死亡率(‰)和占比 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 东部省份 | 北京 天津 河北 黑龙江 吉林 辽宁 山东 上海 浙江 江苏 福建 广东 海南 | 5.2993 | 0.9987 (18.85%) | 0.9957 (18.79%) | 0.4577 (8.64%) | 0.3551 (6.70%) |
| 中部省份 | 山西 河南 湖南 江西 安徽 湖北 | 5.1161 | 0.9270 (18.12%) | 1.0905 (21.32%) | 0.4151 (8.11%) | 0.3698 (7.23%) |
| 西部省份 | 新疆 内蒙古 青海 陕西 宁夏 甘肃 重庆 四川 云南 贵州 广西 西藏 | 5.2054 | 0.6152 (11.82%) | 0.9812 (18.85%) | 0.3490 (6.70%) | 0.7267 (13.96%) |

表 7 中国 31 个省会城市或直辖市 2013 年底的居民非意外总死亡率和四种病因别死

亡率

| 城市 | 所属省份及南北方 | 2013年非意外总死亡率(‰) | 2013年缺血性心脏病死亡率(‰) | 2013年脑血管病死亡率(‰) | 2013年肺癌死亡率(‰) | 2013年慢性阻塞性肺疾病死亡率(‰) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 北京 北 | 4.5200 | 0.8518 | 0.8493 | 0.3904 | 0.3029 |
| 天津 | 天津 北 | 6.0000 | 1.1308 | 1.1274 | 0.5182 | 0.4021 |
| 石家庄 | 河北 北 | 6.8700 | 1.2947 | 1.2908 | 0.5934 | 0.4604 |
| 哈尔滨 | 黑龙江 北 | 6.0800 | 1.1458 | 1.1424 | 0.5251 | 0.4074 |
| 长春 | 吉林 北 | 5.0400 | 0.9498 | 0.9470 | 0.4353 | 0.3377 |
| 沈阳 | 辽宁 北 | 6.1200 | 1.1534 | 1.1499 | 0.5286 | 0.4101 |
| 呼和浩特 | 内蒙古 北 | 5.6200 | 0.6642 | 1.0594 | 0.3768 | 0.7846 |
| 银川 | 宁夏 北 | 4.5000 | 0.5318 | 0.8482 | 0.3017 | 0.6282 |
| 兰州 | 甘肃 北 | 6.0800 | 0.7186 | 1.1461 | 0.4076 | 0.8488 |
| 太原 | 山西 北 | 5.5700 | 1.0092 | 1.1872 | 0.4519 | 0.4026 |
| 西宁 | 青海 北 | 4.5300 | 0.5354 | 0.8539 | 0.3037 | 0.6324 |
| 西安 | 陕西 北 | 5.3719 | 0.6349 | 1.0126 | 0.3602 | 0.7499 |
| 济南 | 山东 北 | 6.8200 | 1.2853 | 1.2814 | 0.5890 | 0.4570 |
| 郑州 | 河南 北 | 4.3100 | 0.7809 | 0.9187 | 0.3497 | 0.3115 |
| 乌鲁木齐 | 新疆 北 | 2.7000 | 0.3191 | 0.5089 | 0.1810 | 0.3769 |
| 上海 | 上海 南 | 5.2400 | 0.9875 | 0.9846 | 0.4526 | 0.3511 |
| 重庆 | 重庆 南 | 6.7700 | 0.8001 | 1.2761 | 0.4539 | 0.9451 |
| 成都 | 四川 南 | 6.9000 | 0.8155 | 1.3006 | 0.4626 | 0.9633 |
| 昆明 | 云南 南 | 6.4300 | 0.7599 | 1.2120 | 0.4311 | 0.8977 |
| 贵阳 | 贵州 南 | 7.1500 | 0.8450 | 1.3478 | 0.4794 | 0.9982 |
| 长沙 | 湖南 南 | 6.9600 | 1.2611 | 1.4835 | 0.5647 | 0.5031 |
| 南宁 | 广西 南 | 6.3500 | 0.7505 | 1.1970 | 0.4257 | 0.8865 |
| 南昌 | 江西 南 | 6.2800 | 1.1379 | 1.3386 | 0.5095 | 0.4539 |
| 合肥 | 安徽 南 | 6.0600 | 1.0980 | 1.2917 | 0.4917 | 0.4380 |
| 拉萨 | 西藏 南 | 5.3900 | 0.6370 | 1.0160 | 0.3614 | 0.7525 |
| 杭州 | 浙江 南 | 4.9700 | 0.9366 | 0.9338 | 0.4293 | 0.3330 |
| 南京 | 江苏 南 | 7.0100 | 1.3211 | 1.3171 | 0.6055 | 0.4697 |
| 武汉 | 湖北 南 | 6.1500 | 1.1143 | 1.3109 | 0.4990 | 0.4445 |
| 福州 | 福建 南 | 6.0100 | 1.1326 | 1.1292 | 0.5191 | 0.4027 |
| 广州 | 广东 南 | 4.6900 | 0.8839 | 0.8812 | 0.4051 | 0.3143 |
| 海口 | 海南 南 | 5.9000 | 1.1119 | 1.1086 | 0.5096 | 0.3954 |

## 2.1 整合风险函数的假设条件

以下内容翻译自参考文献[38]

（1）暴露于多种燃烧源的$PM_{2.5}$均导致缺血性心脏病、脑卒中、慢性阻塞性肺疾病和肺癌死亡率的上升，导致急性下呼吸道感染发病率的上升。此假设是基于全球疾病负担2010项目中的流行病学文献综述作出。

（2）环境大气污染 ambient air pollution AAP，二手烟 second hand tobacco smoke SHS，室内烹饪固体燃料燃烧 household solid cooking fuel HAP，吸烟 active smoking AS 来源的$PM_{2.5}$所致的死亡率上升的风险，是基于其吸入质量浓度计算，不同来源的$PM_{2.5}$成分的差异未纳入考虑。

（3）$PM_{2.5}$暴露与超额死亡率间的相关性不局限为线性。

（4）由于上述四种来源的$PM_{2.5}$导致的所选慢性疾病死亡率的风险上升，可被理解为每日$PM_{2.5}$暴露的长期累积效应，与每日$PM_{2.5}$随时间变化的模式无关。我们需要说明这一假设，是因为 AAS，SHS，HAPs，AS 的每日随时间变化模型大不相同。

（5）每种来源的 $PM_{2.5}$ 导致的死亡率上升风险与其他来源的 $PM_{2.5}$ 不相关，不同来源的$PM_{2.5}$暴露之间没有交互作用。

## 2.2 整合风险函数的模型形式和 RR 值的确定

整合风险函数的模型形式相关内容翻译自参考文献[38]

我们依照以往暴露-反应关系模型形式的经验来选取整合暴露-反应关系模型（Integrated Exposure-Response，IER）的数学形式。第一，我们希望这个IER的数学形式能够描述之前进行风险评价时所用的模型的暴露-反应曲线形状，例如线性、对数线性和幂函数。第二，我们还希望它能够做到在高暴露浓度时将曲线平滑，以保证与已发表的缺血性心脏病死亡率和吸烟间的关系保持一致。第三，它还必须做到在$PM_{2.5}$浓度低于一定值的时候将RR保持在等于1，即低于此浓度水平的暴露不具有造成健康损害的风险。第四，我们预期的整合暴露-反应关系曲线是随着$PM_{2.5}$暴露浓度的升高而单调上升的，且可以变换多种形式，例如近似线性、分段线性或超线性。我们的IER数学形式如下：

$$\text{for } z < z_{cf},\ RR_{IER}(z) = 1$$

$$\text{for } z \geq z_{cf},\ RR_{IER}(z) = 1 + \alpha \{1 - \exp[-\gamma (z - z_{cf})^{\delta}]\} \quad [1]$$

z 是 $PM_{2.5}$ 暴露浓度，$z_{cf}$ 是假设低于此浓度时不具有健康损害风险的浓度（本底浓度）。当 z 值非常大，$RR_{IER}$~1+α。我们利用一个指数 δ 来评估一定范围内 $PM_{2.5}$ 浓度的健康损害风险。$RR_{IER}(z_{cf}+1)$~1+αγ，因此 γ =[$RR_{IER}(z_{cf}+1)$-1]/[$RR_{IER}(\infty)$-1]可以被解释为低暴露浓度相对高暴露浓度的 RR 的比值比。我们将此模型命名为整合暴露-反应关系模型，是因为它的建立过程需要整合各种燃烧源的 $PM_{2.5}$ 暴露（环境大气污染 ambient air pollution AAP，二手烟 second hand tobacco smoke SHS，室内烹饪固体燃料燃烧 household solid cooking fuel HAP，吸烟 active smoking AS）。

基于已有的相关文献，我们收集 $PM_{2.5}$ 暴露致死亡率上升的 RR（及其置信区间），可以表示为式[2]，相应的 $PM_{2.5}$ 浓度可以表示为式[3]。其中 S 代表不同的 $PM_{2.5}$ 来源，$K_s$ 是估算 S 来源的 $PM_{2.5}$ 致死亡率上升的研究数量，即 S 来源的 $PM_{2.5}$ 致死亡率上升的可参考的 RR 值的个数。α、β 和 δ 是未知参数，由非线性回归方法推算。我们用文献中每个 RR 估计值的对数的方差估计值的倒数来为该 RR 估计值加权，以反映该 RR 估计值的不确定性。

$$\{\hat{r}_1^{(s)},\ldots,\hat{r}_{K_s}^{(s)}, s = 1,\ldots,S\} \quad [2]$$

$$\{z_1^{(s)},\ldots,z_{K_s}^{(s)}, s = 1,\ldots,S\} \quad [3]$$

针对每种病因别死亡率（共四种），在已有相关文献所显示的每种来源的 $PM_{2.5}$ 暴露致死亡率上升的 RR 的点估计值和置信区间的范围内，我们以随机生成数的方法，假设了 1000 个 RR 值，结合相应的 $PM_{2.5}$ 浓度，推算出了 1000 组（α，γ，δ）参数值。利用参数值我们建立了覆盖全球 $PM_{2.5}$ 浓度范围的 1000

个整合暴露-反应关系模型。

在建立了整合暴露-反应关系模型后，$PM_{2.5}$年均浓度为国标情景、2017情景、基线情景三种浓度水平下，相对于WHO情景浓度下，各城市缺血性心脏病、脑血管病、慢性阻塞性肺疾病和肺癌死亡率的相对危险度可计算获得。进而，我们改将基线情景下的上述四种病因别死亡率（即31个省会城市或直辖市2013年上述四种疾病的实际病因别死亡率）设定为RR=1，反推出WHO情景相对于基线情景四种病因别死亡率的相对危险度，再推算出国标情景和2017情景相对于基线情景四种病因别死亡率的相对危险度。详见表8(1-3)。$PM_{2.5}$年均浓度在WHO情景、国标情景、2017情景下，相对于基线情景下即$PM_{2.5}$年均浓度为2013年实测值，RR值均小于1，这体现出降低$PM_{2.5}$年均浓度对居民健康可起到保护性作用。

表8(1) WHO情景相对于基线情景居民病因别死亡率的相对危险度

| 城市 | 缺血性心脏病RR（95%置信区间） | 脑血管病RR（95%置信区间） | 肺癌RR（95%置信区间） | 慢性阻塞性肺疾病RR（95%置信区间） |
|---|---|---|---|---|
| 北京 | 0.7526(0.8589,0.5536) | 0.5404(0.8488,0.4417) | 0.6945(0.9023,0.5880) | 0.7640(0.8859,0.6660) |
| 天津 | 0.7511(0.8576,0.5518) | 0.5394(0.8476,0.4409) | 0.6915(0.9001,0.5851) | 0.7616(0.8839,0.6636) |
| 石家庄 | 0.7189(0.8299,0.5221) | 0.5224(0.8176,0.4343) | 0.6211(0.8444,0.5171) | 0.7047(0.8375,0.6015) |
| 哈尔滨 | 0.7676(0.8704,0.5719) | 0.5517(0.8612,0.4464) | 0.7232(0.9218,0.6152) | 0.7867(0.9037,0.6895) |
| 长春 | 0.7789(0.8789,0.5875) | 0.5621(0.8713,0.4516) | 0.7435(0.9347,0.6356) | 0.8026(0.9149,0.7059) |
| 沈阳 | 0.7722(0.8737,0.5779) | 0.5557(0.8654,0.4482) | 0.7316(0.9273,0.6234) | 0.7933(0.9084,0.6963) |
| 呼和浩特 | 0.7879(0.8858,0.6024) | 0.5718(0.8790,0.4569) | 0.7590(0.9440,0.6518) | 0.8146(0.9238,0.7195) |
| 银川 | 0.8215(0.9099,0.6671) | 0.6214(0.9004,0.4940) | 0.8115(0.9722,0.7089) | 0.8551(0.9516,0.7637) |
| 兰州 | 0.7816(0.8810,0.5918) | 0.5649(0.8736,0.4532) | 0.7482(0.9376,0.6405) | 0.8062(0.9175,0.7097) |
| 太原 | 0.7697(0.8719,0.5747) | 0.5535(0.8631,0.4476) | 0.7271(0.9244,0.6189) | 0.7898(0.9059,0.6926) |
| 西宁 | 0.7834(0.8824,0.5947) | 0.5668(0.8752,0.4541) | 0.7514(0.9395,0.6438) | 0.8087(0.9194,0.7126) |
| 西安 | 0.7399(0.8480,0.5393) | 0.5325(0.8377,0.4385) | 0.6683(0.8830,0.5626) | 0.7431(0.8694,0.6426) |
| 济南 | 0.7325(0.8417,0.5320) | 0.5286(0.8300,0.4367) | 0.6524(0.8705,0.5474) | 0.7302(0.8590,0.6283) |
| 郑州 | 0.7389(0.8471,0.5382) | 0.5320(0.8369,0.4380) | 0.6661(0.8813,0.5605) | 0.7413(0.8680,0.6407) |
| 乌鲁木齐 | 0.7520(0.8583,0.5528) | 0.5399(0.8483,0.4414) | 0.6932(0.9014,0.5867) | 0.7630(0.8850,0.6650) |
| 上海 | 0.7875(0.8856,0.6018) | 0.5714(0.8787,0.4568) | 0.7584(0.9436,0.6511) | 0.8142(0.9234,0.7190) |
| 杭州 | 0.7826(0.8818,0.5935) | 0.5660(0.8745,0.4537) | 0.7500(0.9387,0.6424) | 0.8077(0.9186,0.7114) |
| 南京 | 0.7699(0.8721,0.5750) | 0.5537(0.8634,0.4476) | 0.7275(0.9247,0.6194) | 0.7901(0.9061,0.6929) |
| 广州 | 0.8174(0.9071,0.6587) | 0.6142(0.8973,0.4876) | 0.8055(0.9692,0.7023) | 0.8505(0.9486,0.7589) |
| 重庆 | 0.7872(0.8853,0.6012) | 0.5711(0.8784,0.4565) | 0.7579(0.9433,0.6506) | 0.8138(0.9231,0.7186) |
| 成都 | 0.7557(0.8615,0.5572) | 0.5425(0.8511,0.4426) | 0.7006(0.9066,0.5937) | 0.7689(0.8898,0.6708) |
| 昆明 | 0.8422(0.9239,0.7084) | 0.6636(0.9151,0.5362) | 0.8405(0.9857,0.7418) | 0.8772(0.9659,0.7933) |
| 贵阳 | 0.8121(0.9034,0.6481) | 0.6052(0.8933,0.4807) | 0.7976(0.9652,0.6936) | 0.8444(0.9447,0.7527) |
| 长沙 | 0.7642(0.8678,0.5675) | 0.5489(0.8581,0.4452) | 0.7169(0.9177,0.6091) | 0.7817(0.8999,0.6845) |
| 武汉 | 0.7527(0.8589,0.5537) | 0.5404(0.8488,0.4418) | 0.6946(0.9023,0.5880) | 0.7641(0.8859,0.6661) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 南宁 | 0.8039(0.8976,0.6324) | 0.5926(0.8887,0.4699) | 0.7850(0.9585,0.6797) | 0.8347(0.9382,0.7428) |
| 南昌 | 0.7813(0.8808,0.5912) | 0.5645(0.8734,0.4530) | 0.7477(0.9372,0.6399) | 0.8058(0.9172,0.7092) |
| 福州 | 0.8535(0.9315,0.7306) | 0.6900(0.9221,0.5604) | 0.8555(0.9921,0.7596) | 0.8886(0.9728,0.8076) |
| 海口 | 0.8803(0.9500,0.7884) | 0.7588(0.9379,0.5989) | 0.8885(1.0000,0.8005) | 0.9137(0.9870,0.8405) |
| 合肥 | 0.7587(0.8636,0.5607) | 0.5447(0.8534,0.4436) | 0.7064(0.9106,0.5992) | 0.7734(0.8934,0.6753) |
| 拉萨 | 0.8880(0.9550,0.8035) | 0.7798(0.9424,0.6178) | 0.8974(1.0000,0.8125) | 0.9205(0.9905,0.8484) |

表 8(2) 国标情景相对于基线情景居民病因别死亡率的相对危险度

| 城市 | 缺血性心脏病 RR（95%置信区间） | 脑血管病 RR（95%置信区间） | 肺癌 RR（95%置信区间） | 慢性阻塞性肺疾病 RR（95%置信区间） |
|---|---|---|---|---|
| 北京 | 0.8832(0.9894,0.6842) | 0.7868(1.0000,0.6882) | 0.8135(1.0000,0.7070) | 0.8611(0.9829,0.7631) |
| 天津 | 0.8814(0.9879,0.6821) | 0.7854(1.0000,0.6869) | 0.8099(1.0000,0.7035) | 0.8583(0.9807,0.7604) |
| 石家庄 | 0.8436(0.9546,0.6469) | 0.7606(1.0000,0.6726) | 0.7275(0.9508,0.6235) | 0.7942(0.9270,0.6910) |
| 哈尔滨 | 0.9007(1.0000,0.7050) | 0.8033(1.0000,0.6980) | 0.8471(1.0000,0.7391) | 0.8866(1.0000,0.7894) |
| 长春 | 0.9140(1.0000,0.7226) | 0.8185(1.0000,0.7080) | 0.8709(1.0000,0.7629) | 0.9045(1.0000,0.8078) |
| 沈阳 | 0.9062(1.0000,0.7119) | 0.8092(1.0000,0.7016) | 0.8570(1.0000,0.7487) | 0.8941(1.0000,0.7971) |
| 呼和浩特 | 0.9245(1.0000,0.7390) | 0.8326(1.0000,0.7177) | 0.8890(1.0000,0.7818) | 0.9181(1.0000,0.8230) |
| 银川 | 0.9640(1.0000,0.8096) | 0.9049(1.0000,0.7774) | 0.9505(1.0000,0.8479) | 0.9637(1.0000,0.8723) |
| 兰州 | 0.9172(1.0000,0.7274) | 0.8225(1.0000,0.7108) | 0.8764(1.0000,0.7686) | 0.9086(1.0000,0.8121) |
| 太原 | 0.9032(1.0000,0.7082) | 0.8060(1.0000,0.7001) | 0.8517(1.0000,0.7435) | 0.8900(1.0000,0.7929) |
| 西宁 | 0.9193(1.0000,0.7306) | 0.8253(1.0000,0.7126) | 0.8801(1.0000,0.7725) | 0.9114(1.0000,0.8153) |
| 西安 | 0.8683(0.9763,0.6676) | 0.7754(1.0000,0.6813) | 0.7828(0.9975,0.6771) | 0.8375(0.9638,0.7370) |
| 济南 | 0.8596(0.9688,0.6591) | 0.7697(1.0000,0.6778) | 0.7641(0.9822,0.6591) | 0.8230(0.9517,0.7210) |
| 郑州 | 0.8671(0.9753,0.6664) | 0.7746(1.0000,0.6806) | 0.7802(0.9954,0.6746) | 0.8355(0.9621,0.7348) |
| 乌鲁木齐 | 0.8824(0.9888,0.6833) | 0.7862(1.0000,0.6876) | 0.8120(1.0000,0.7055) | 0.8599(0.9819,0.7619) |
| 上海 | 0.9241(1.0000,0.7384) | 0.8320(1.0000,0.7174) | 0.8883(1.0000,0.7811) | 0.9176(1.0000,0.8224) |
| 杭州 | 0.9184(1.0000,0.7293) | 0.8241(1.0000,0.7119) | 0.8785(1.0000,0.7708) | 0.9102(1.0000,0.8139) |
| 南京 | 0.9035(1.0000,0.7085) | 0.8063(1.0000,0.7002) | 0.8522(1.0000,0.7440) | 0.8904(1.0000,0.7933) |
| 广州 | 0.9592(1.0000,0.8005) | 0.8943(1.0000,0.7677) | 0.9435(1.0000,0.8403) | 0.9585(1.0000,0.8670) |
| 重庆 | 0.9238(1.0000,0.7378) | 0.8315(1.0000,0.7170) | 0.8877(1.0000,0.7805) | 0.9171(1.0000,0.8219) |
| 成都 | 0.8868(0.9926,0.6883) | 0.7900(1.0000,0.6900) | 0.8206(1.0000,0.7137) | 0.8665(0.9874,0.7684) |
| 昆明 | 0.9883(1.0000,0.8545) | 0.9663(1.0000,0.8389) | 0.9845(1.0000,0.8857) | 0.9886(1.0000,0.9047) |
| 贵阳 | 0.9530(1.0000,0.7889) | 0.8813(1.0000,0.7567) | 0.9342(1.0000,0.8302) | 0.9517(1.0000,0.8599) |
| 长沙 | 0.8968(1.0000,0.7000) | 0.7993(1.0000,0.6956) | 0.8397(1.0000,0.7319) | 0.8810(0.9992,0.7838) |
| 武汉 | 0.8832(0.9895,0.6842) | 0.7869(1.0000,0.6882) | 0.8135(1.0000,0.7070) | 0.8611(0.9829,0.7631) |
| 南宁 | 0.9433(1.0000,0.7719) | 0.8629(1.0000,0.7402) | 0.9194(1.0000,0.8141) | 0.9407(1.0000,0.8488) |
| 南昌 | 0.9168(1.0000,0.7268) | 0.8220(1.0000,0.7105) | 0.8758(1.0000,0.7680) | 0.9082(1.0000,0.8116) |
| 福州 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 |
| 海口 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 |
| 合肥 | 0.8903(0.9952,0.6923) | 0.7931(1.0000,0.6920) | 0.8274(1.0000,0.7202) | 0.8717(0.9916,0.7735) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 拉萨 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 |

表 8(3) 2017 情景相对于基线情景居民病因别死亡率的相对危险度

| 城市 | 缺血性心脏病 RR（95%置信区间） | 脑血管病 RR（95%置信区间） | 肺癌 RR（95%置信区间） | 慢性阻塞性肺疾病 RR（95%置信区间） |
|---|---|---|---|---|
| 北京 | 0.9465(1.0000,0.7475) | 0.9306(1.0000,0.8320) | 0.9008(1.0000,0.7942) | 0.9273(1.0000,0.8293) |
| 天津 | 0.9648(1.0000,0.7654) | 0.9601(1.0000,0.8616) | 0.9307(1.0000,0.8243) | 0.9494(1.0000,0.8515) |
| 石家庄 | 0.9538(1.0000,0.7570) | 0.9653(1.0000,0.8773) | 0.8914(1.0000,0.7875) | 0.9203(1.0000,0.8170) |
| 哈尔滨 | 0.9895(1.0000,0.7938) | 0.9870(1.0000,0.8816) | 0.9801(1.0000,0.8720) | 0.9856(1.0000,0.8884) |
| 长春 | 年均浓度逐渐下降 | 年均浓度逐渐下降 | 年均浓度逐渐下降 | 年均浓度逐渐下降 |
| 沈阳 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 呼和浩特 | 0.9865(1.0000,0.8010) | 0.9770(1.0000,0.8621) | 0.9772(1.0000,0.8700) | 0.9835(1.0000,0.8884) |
| 银川 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 兰州 | 0.9934(1.0000,0.8036) | 0.9901(1.0000,0.8784) | 0.9883(1.0000,0.8805) | 0.9915(1.0000,0.8950) |
| 太原 | 0.9721(1.0000,0.7770) | 0.9602(1.0000,0.8542) | 0.9498(1.0000,0.8416) | 0.9634(1.0000,0.8663) |
| 西宁 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 西安 | 0.9874(1.0000,0.7868) | 0.9895(1.0000,0.8954) | 0.9715(1.0000,0.8658) | 0.9793(1.0000,0.8789) |
| 济南 | 0.9736(1.0000,0.7730) | 0.9785(1.0000,0.8865) | 0.9398(1.0000,0.8348) | 0.9561(1.0000,0.8542) |
| 郑州 | 0.9805(1.0000,0.7799) | 0.9833(1.0000,0.8893) | 0.9566(1.0000,0.8510) | 0.9685(1.0000,0.8678) |
| 乌鲁木齐 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 上海 | 0.9719(1.0000,0.7861) | 0.9485(1.0000,0.8339) | 0.9540(1.0000,0.8468) | 0.9665(1.0000,0.8714) |
| 杭州 | 0.9621(1.0000,0.7730) | 0.9318(1.0000,0.8195) | 0.9380(1.0000,0.8303) | 0.9547(1.0000,0.8585) |
| 南京 | 0.9722(1.0000,0.7772) | 0.9602(1.0000,0.8541) | 0.9500(1.0000,0.8418) | 0.9636(1.0000,0.8664) |
| 广州 | 0.9716(1.0000,0.8129) | 0.9282(1.0000,0.8016) | 0.9597(1.0000,0.8564) | 0.9705(1.0000,0.8789) |
| 重庆 | 0.9779(1.0000,0.7919) | 0.9609(1.0000,0.8463) | 0.9633(1.0000,0.8560) | 0.9733(1.0000,0.8781) |
| 成都 | 0.9726(1.0000,0.7740) | 0.9682(1.0000,0.8683) | 0.9464(1.0000,0.8395) | 0.9610(1.0000,0.8629) |
| 昆明 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 贵阳 | 0.9908(1.0000,0.8267) | 0.9791(1.0000,0.8545) | 0.9861(1.0000,0.8820) | 0.9899(1.0000,0.8981) |
| 长沙 | 0.9819(1.0000,0.7852) | 0.9775(1.0000,0.8739) | 0.9655(1.0000,0.8577) | 0.9749(1.0000,0.8778) |
| 武汉 | 0.9738(1.0000,0.7748) | 0.9712(1.0000,0.8726) | 0.9476(1.0000,0.8411) | 0.9619(1.0000,0.8639) |
| 南宁 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 南昌 | 0.9597(1.0000,0.7697) | 0.9278(1.0000,0.8163) | 0.9340(1.0000,0.8262) | 0.9518(1.0000,0.8552) |
| 福州 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 海口 | 相对 2013 年保持不变 | 相对 2013 年保持不变 | 相对 2013 年保持不变 | 相对 2013 年保持不变 |
| 合肥 | 0.9724(1.0000,0.7744) | 0.9665(1.0000,0.8654) | 0.9470(1.0000,0.8398) | 0.9614(1.0000,0.8633) |
| 拉萨 | 不超过 2013 年浓度 | 不超过 2013 年浓度 | 不超过 2013 年浓度 | 不超过 2013 年浓度 |

### 3. 计算可避免的超额死亡人数

在求得各城市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度为 WHO 情景、国标情景、2017 情景下浓度

值时，分别相对于基线情景即 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 2013 年实测值，缺血性心脏病、脑血管病、慢性阻塞性肺疾病和肺癌死亡率的相对危险度后，基于以下公式[A]，结合 2013 年中国 31 个省会城市或直辖市居民病因别死亡率，可计算出 WHO 情景下上述四种病因别死亡率，即当 $PM_{2.5}$ 长期暴露的影响可忽略时，城市中所有其他影响上述四种病因别死亡率的因素集合在一起，造成的预期死亡人数。之后，同样是基于公式[A]，又可计算出各城市国标情景、2017 情景两种浓度情景下的病因别死亡率。再结合中国 31 个省会城市或直辖市 2013 年的常住人口数，即可计算各城市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度从基线情景即其 2013 年实测值下降至 WHO 情景（$10\mu g/m^3$）、国标情景（$35\mu g/m^3$）、2017 情景（城市 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标值）后，长期暴露下，一年分别可避免的四种病因别超额死亡人数，和每十万常住人口中一年分别可避免的四种病因别超额死亡人数。

Base M e 目标值 = Back M or Scen M [A]

*式中：Back M：本底死亡率（Background Mortality），即刨除 $PM_{2.5}$ 污染造成的超额死亡后，某一城市居民的死亡率，也可称之为 $PM_{2.5}$ 空气污染健康损害可忽略情况下的理想死亡率，包括本底缺血性心脏病、脑血管病、肺癌和慢性阻塞性肺疾病死亡率；本研究中本底情景为 WHO 情景。*

*Scen M：情景下死亡率（Scenario Mortality），各城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度在国标情景、2017 情景浓度值时，居民的病因别死亡率。*

*Base M：基线死亡率（Baseline Mortality），各城市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度为基线情景即 2013 年实测值时，居民的病因别死亡率，即收集到的 2013 年底中国 31 个省会城市或直辖市居民病因别死亡率。*

# 四． 结果

## 1. 可避免的超额死亡人数

每个城市的 $PM_{2.5}$ 年均浓度从基线情景（2013 年实测值）下降达到 WHO 情景（WHO 空气质量准则 $10\mu g/m^3$）这一目标后可避免的病因别超额死亡数，详见表 9(1)。

每个城市的 $PM_{2.5}$ 年均浓度从基线情景下降达到国标情景（国家二级空气质量浓度限值 $35\mu g/m^3$）这一目标后可避免的病因别超额死亡数，详见表 9(2)。

每个城市的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度从基线情景下降达到 2017 情景（2017 年浓度下降目标）后可避免的病因别超额死亡数，详见表 9(3)。

表 9(1) 大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从基线情景下降到 WHO 情景后可避免的超额死亡数
（注：括号内数字为 95%置信区间）

| 城市 | 缺血性心脏病死亡人数 | 脑血管病死亡人数 | 肺癌死亡人数 | 慢性阻塞性肺疾病死亡人数 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 4456(2542,8041) | 8255(2715,10027) | 2522(807,3401) | 1511(731,2139) | 16744(6795,23608) |
| 天津 | 4143(2371,7461) | 7645(2530,9280) | 2354(762,3166) | 1411(687,1991) | 15553(6350,21898) |
| 石家庄 | 3821(2312,6496) | 6474(2472,7667) | 2361(970,3009) | 1427(785,1926) | 14083(6539,19098) |
| 哈尔滨 | 2833(1579,5218) | 5447(1686,6727) | 1546(436,2149) | 924(417,1345) | 10750(4118,15439) |
| 长春 | 1623(889,3028) | 3205(942,4013) | 863(220,1226) | 515(222,768) | 6206(2273,9035) |
| 沈阳 | 2169(1203,4019) | 4218(1278,5240) | 1171(317,1644) | 700(310,1028) | 8258(3108,11931) |
| 呼和浩特 | 423(228,793) | 1361(385,1727) | 273(63,394) | 437(180,660) | 2494(856,3574) |
| 银川 | 198(100,369) | 669(176,894) | 118(17,183) | 190(63,309) | 1175(356,1755) |
| 兰州 | 572(311,1068) | 1816(527,2282) | 374(93,534) | 599(255,897) | 3361(1186,4781) |
| 太原 | 994(553,1836) | 2268(695,2805) | 528(146,737) | 362(162,529) | 4152(1556,5907) |
| 西宁 | 263(143,492) | 839(242,1057) | 171(42,245) | 274(116,412) | 1547(543,2206) |
| 西安 | 1418(829,2512) | 4065(1412,4883) | 1026(362,1353) | 1655(841,2302) | 8164(3444,11050) |
| 济南 | 2406(1424,4210) | 4228(1525,5052) | 1433(534,1866) | 863(451,1189) | 8930(3934,12317) |
| 郑州 | 1874(1098,3315) | 3952(1377,4746) | 1073(382,1413) | 741(378,1029) | 7640(3235,10503) |
| 乌鲁木齐 | 274(156,494) | 810(267,984) | 192(62,259) | 309(150,437) | 1585(635,2174) |
| 上海 | 5068(2729,9498) | 10192(2885,12918) | 2641(616,3813) | 1576(649,2383) | 19477(6879,28612) |
| 杭州 | 1801(979,3367) | 3585(1036,4511) | 949(233,1358) | 567(240,850) | 6902(2488,10086) |
| 南京 | 2489(1383,4598) | 4813(1474,5957) | 1351(373,1887) | 807(361,1181) | 9460(3591,13623) |
| 广州 | 2087(1062,3899) | 4395(1169,5837) | 1018(161,1559) | 607(209,979) | 8107(2601,12274) |
| 重庆 | 5056(2725,9476) | 16257(4608,20599) | 3264(764,4710) | 5227(2157,7900) | 29804(10254,42685) |
| 成都 | 2848(1615,5163) | 8508(2768,10366) | 1980(618,2687) | 3183(1518,4534) | 16519(6519,22750) |
| 昆明 | 789(381,1458) | 2683(677,3698) | 452(41,732) | 725(202,1221) | 4649(1301,7109) |
| 贵阳 | 718(369,1345) | 2406(650,3165) | 439(75,664) | 702(250,1116) | 4265(1344,6290) |
| 长沙 | 2148(1204,3939) | 4833(1520,5943) | 1155(336,1594) | 793(364,1146) | 8929(3424,12622) |
| 武汉 | 2817(1607,5083) | 6157(2025,7479) | 1558(498,2101) | 1072(518,1517) | 11604(4648,16180) |
| 南宁 | 1066(556,1999) | 3533(965,4597) | 663(128,988) | 1062(397,1652) | 6324(2046,9236) |
| 南昌 | 1290(703,2411) | 3022(879,3796) | 667(166,951) | 757(323,1134) | 5736(2071,8292) |
| 福州 | 1218(570,2240) | 2570(646,3644) | 551(30,916) | 329(80,569) | 4668(1326,7369) |
| 海口 | 289(121,511) | 581(149,965) | 123(0,221) | 74(11,137) | 1067(281,1834) |
| 合肥 | 2017(1140,3671) | 4477(1441,5470) | 1099(335,1500) | 755(355,1083) | 8348(3271,11724) |
| 拉萨 | 36(14,63) | 112(29,195) | 19(0,34) | 30(4,57) | 197(47,349) |

表 9(2) 大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从基线情景下降到国标情景后可避免的超额死亡数（注：括号内数字为 95%置信区间）

| 城市 | 缺血性心脏病死亡人数 | 脑血管病死亡人数 | 肺癌死亡人数 | 慢性阻塞性肺疾病死亡人数 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 2104(190,5689) | 3828(0,5600) | 1540(0,2419) | 890(109,1518) | 8362(299,15226) |
| 天津 | 1974(202,5292) | 3562(0,5197) | 1450(0,2262) | 839(114,1418) | 7825(316,14169) |
| 石家庄 | 2126(617,4801) | 3244(0,4437) | 1698(307,2346) | 995(353,1494) | 8063(1277,13078) |
| 哈尔滨 | 1210(0,3595) | 2390(0,3669) | 854(0,1457) | 491(0,913) | 4945(0,9634) |
| 长春 | 631(0,2036) | 1329(0,2137) | 434(0,798) | 249(0,502) | 2643(0,5473) |
| 沈阳 | 894(0,2744) | 1811(0,2833) | 624(0,1097) | 359(0,687) | 3688(0,7361) |
| 呼和浩特 | 150(0,520) | 532(0,898) | 126(0,247) | 193(0,417) | 1001(0,2082) |
| 银川 | 40(0,211) | 168(0,393) | 31(0,96) | 48(0,167) | 287(0,867) |
| 兰州 | 217(0,713) | 741(0,1207) | 183(0,343) | 282(0,581) | 1423(0,2844) |
| 太原 | 418(0,1260) | 985(0,1523) | 287(0,496) | 189(0,357) | 1879(0,3636) |
| 西宁 | 98(0,327) | 338(0,556) | 83(0,157) | 127(0,265) | 646(0,1305) |
| 西安 | 718(129,1812) | 1953(0,2771) | 672(8,999) | 1047(233,1694) | 4390(370,7276) |
| 济南 | 1263(281,3067) | 2065(0,2890) | 972(73,1405) | 566(154,892) | 4866(508,8254) |
| 郑州 | 954(177,2394) | 1903(0,2697) | 706(15,1046) | 471(108,759) | 4034(300,6896) |
| 乌鲁木齐 | 130(12,350) | 376(0,550) | 118(0,184) | 183(24,310) | 807(36,1394) |
| 上海 | 1809(0,6240) | 3994(0,6720) | 1221(0,2393) | 699(0,1506) | 7723(0,16859) |
| 杭州 | 676(0,2243) | 1453(0,2379) | 461(0,870) | 264(0,548) | 2854(0,6040) |
| 南京 | 1044(0,3153) | 2089(0,3233) | 733(0,1269) | 421(0,795) | 4287(0,8450) |
| 广州 | 466(0,2279) | 1204(0,2646) | 296(0,836) | 169(0,540) | 2135(0,6301) |
| 重庆 | 1811(0,6230) | 6385(0,10727) | 1514(0,2960) | 2327(0,4999) | 12037(0,24916) |
| 成都 | 1320(87,3634) | 3906(0,5764) | 1186(0,1893) | 1839(173,3189) | 8251(260,14480) |
| 昆明 | 59(0,727) | 269(0,1285) | 44(0,324) | 67(0,563) | 439(0,2899) |
| 贵阳 | 180(0,806) | 723(0,1483) | 143(0,368) | 218(0,632) | 1264(0,3289) |
| 长沙 | 940(0,2732) | 2151(0,3261) | 654(0,1093) | 432(3,785) | 4177(3,7871) |
| 武汉 | 1330(120,3596) | 2855(0,4177) | 951(0,1494) | 631(78,1076) | 5767(198,10343) |
| 南宁 | 308(0,1240) | 1189(0,2253) | 249(0,573) | 381(0,971) | 2127(0,5037) |
| 南昌 | 491(0,1612) | 1235(0,2009) | 328(0,613) | 358(0,735) | 2412(0,4969) |
| 福州 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 |
| 海口 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 |
| 合肥 | 917(40,2571) | 2034(0,3028) | 646(0,1047) | 428(28,755) | 4025(68,7401) |
| 拉萨 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 | 已达标 |

表 9(3) 大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度从基线情景下降到 2017 情景后可避免的超额死亡数（注：括号内数字为 95%置信区间）

| 城市 | 缺血性心脏病死亡人数 | 脑血管病死亡人数 | 肺癌死亡人数 | 慢性阻塞性肺疾病死亡人数 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|
| 北京 | 963(0,4548) | 1246(0,3018) | 819(0,1699) | 466(0,1093) | 3494(0,10358) |
| 天津 | 587(0,3905) | 663(0,2298) | 529(0,1341) | 299(0,879) | 2078(0,8423) |
| 石家庄 | 628(0,3303) | 470(0,1663) | 676(0,1324) | 385(0,884) | 2159(0,7174) |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 哈尔滨 | 127(0,2513) | 159(0,1438) | 111(0,715) | 63(0,484) | 460(0,5150) |
| 长春 | 年均浓度逐渐下降 | 年均浓度逐渐下降 | 年均浓度逐渐下降 | 年均浓度逐渐下降 | 年均浓度逐渐下降 |
| 沈阳 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 呼和浩特 | 27(0,397) | 73(0,438) | 26(0,147) | 39(0,263) | 165(0,1245) |
| 银川 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 兰州 | 17(0,514) | 41(0,507) | 17(0,177) | 26(0,325) | 101(0,1523) |
| 太原 | 121(0,963) | 202(0,740) | 97(0,306) | 63(0,230) | 483(0,2239) |
| 西宁 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 西安 | 69(0,1163) | 92(0,910) | 88(0,415) | 133(0,780) | 382(0,3268) |
| 济南 | 238(0,2042) | 193(0,1018) | 248(0,681) | 140(0,466) | 819(0,4207) |
| 郑州 | 140(0,1580) | 141(0,935) | 139(0,479) | 90(0,378) | 510(0,3372) |
| 乌鲁木齐 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 上海 | 671(0,5102) | 1224(0,3950) | 502(0,1675) | 284(0,1091) | 2681(0,11818) |
| 杭州 | 314(0,1880) | 563(0,1490) | 235(0,644) | 133(0,417) | 1245(0,4431) |
| 南京 | 301(0,2410) | 429(0,1574) | 248(0,784) | 140(0,514) | 1118(0,5282) |
| 广州 | 325(0,2137) | 818(0,2260) | 211(0,752) | 120(0,492) | 1474(0,5641) |
| 重庆 | 526(0,4946) | 1483(0,5824) | 495(0,1941) | 750(0,3423) | 3254(0,16134) |
| 成都 | 320(0,2635) | 590(0,2449) | 355(0,1062) | 537(0,1888) | 1802(0,8034) |
| 昆明 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 贵阳 | 35(0,662) | 127(0,887) | 30(0,256) | 46(0,460) | 238(0,2265) |
| 长沙 | 165(0,1956) | 241(0,1351) | 141(0,580) | 91(0,444) | 638(0,4331) |
| 武汉 | 298(0,2565) | 385(0,1707) | 267(0,810) | 173(0,618) | 1123(0,5700) |
| 南宁 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 南昌 | 238(0,1359) | 501(0,1274) | 174(0,459) | 188(0,565) | 1101(0,3657) |
| 福州 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 | 暂无目标值 |
| 海口 | 相对 2013 年保持不变 | 相对 2013 年保持不变 | 相对 2013 年保持不变 | 相对 2013 年保持不变 | 相对 2013 年保持不变 |
| 合肥 | 231(0,1886) | 329(0,1323) | 198(0,600) | 129(0,456) | 887(0,4265) |
| 拉萨 | 不超过 2013 年浓度 | 不超过 2013 年浓度 | 不超过 2013 年浓度 | 不超过 2013 年浓度 | 不超过 2013 年浓度 |

## 2. 每十万常住人口中可避免的超额死亡人数

每个城市的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度从基线情景下降达到 WHO 情景、国标情景、2017 情景三个目标后，每十万常住人口中分别可避免的上述四种病因别超额死亡数之和，详见表 10。

表 10 大气 PM2.5 年均浓度从基线情景下降到 WHO 情景、国标情景和 2017 情景后，每十万常住人口中可避免的四种病因别超额死亡数之和（注：括号内数字为 95%置信区间）

| 城市 | WHO 情景 | 国标情景 | 2017 情景 |
|---|---|---|---|
| 北京 | 79(32,112) | 40(1,72) | 17(0,49) |
| 天津 | 106(43,149) | 53(2,96) | 14(0,57) |
| 石家庄 | 134(62,182) | 77(12,125) | 21(0,68) |
| 哈尔滨 | 101(39,145) | 46(0,91) | 4(0,48) |
| 长春 | 80(29,117) | 34(0,71) | 年均浓度逐渐下降 |
| 沈阳 | 100(38,144) | 45(0,89) | 暂无目标值 |
| 呼和浩特 | 83(29,119) | 33(0,69) | 5(0,41) |
| 银川 | 56(17,84) | 14(0,42) | 暂无目标值 |
| 兰州 | 92(33,131) | 39(0,78) | 3(0,42) |
| 太原 | 97(36,138) | 44(0,85) | 11(0,52) |
| 西宁 | 68(24,97) | 28(0,58) | 暂无目标值 |
| 西安 | 95(40,129) | 51(4,85) | 4(0,38) |
| 济南 | 128(56,176) | 70(7,118) | 12(0,60) |
| 郑州 | 83(35,114) | 44(3,75) | 6(0,37) |
| 乌鲁木齐 | 46(18,63) | 23(1,40) | 暂无目标值 |
| 上海 | 81(28,118) | 32(0,70) | 11(0,49) |
| 杭州 | 78(28,114) | 32(0,68) | 14(0,50) |
| 南京 | 116(44,166) | 52(0,103) | 14(0,65) |
| 广州 | 63(20,95) | 17(0,49) | 11(0,44) |
| 重庆 | 100(35,144) | 41(0,84) | 11(0,54) |
| 成都 | 116(46,159) | 58(2,101) | 13(0,56) |
| 昆明 | 71(20,108) | 7(0,44) | 暂无目标值 |
| 贵阳 | 94(30,139) | 28(0,73) | 5(0,50) |
| 长沙 | 124(47,175) | 58(0,109) | 9(0,60) |
| 武汉 | 114(45,158) | 56(2,101) | 11(0,56) |
| 南宁 | 87(28,127) | 29(0,70) | 暂无目标值 |
| 南昌 | 111(40,160) | 47(0,96) | 21(0,71) |
| 福州 | 64(18,100) | 已达标 | 暂无目标值 |
| 海口 | 49(13,84) | 已达标 | 相对 2013 年保持不变 |
| 合肥 | 110(43,154) | 53(1,97) | 12(0,56) |
| 拉萨 | 39(9,70) | 已达标 | 不超过 2013 年浓度 |

# 五. 讨论

本研究主要的结果为与最清洁的目标情景“研究主情景”相比较，在基线情景、2017 情景、国标情景暴露水平下，中国 31 个省会城市和直辖市居民因缺血性心脏病、脑血管病、肺癌和慢性阻塞性肺疾病所致的超额死亡人数。

## 1. 不同 $PM_{2.5}$ 浓度水平下的超额死亡情况

与最清洁的目标情景“最清洁情景”相比，2013 年浓度值水平下的 $PM_{2.5}$ 污染对 31 个省会城市或直辖市共造成了 25.7 万例上述四种疾病的病因别超额死亡。超额死亡最多的五个北方城市依次是北京 16745 例、天津 15553 例、石家庄 14083 例、哈尔滨 10750 例、济南 8930 例。超额死亡五个最多的南方城市依次是重庆 29805 例、上海 19476 例、成都 16519 例、武汉 11604 例、南京 9459 例。乌鲁木齐、西宁、银川、海口、拉萨超额死亡人数最少，均在 2000 例以内。

在 21 座已经制定了明确的 2017 年 $PM_{2.5}$ 下降目标的城市中，如能达到 2017 情景下的暴露水平，总共可避免 26217 例超额死亡。其中，可避免超额死亡人数最多的五个城市为北京、重庆、上海、石家庄、天津，分别约 3495 例、3253 例、2682 例、2160 例、2078 例。

除拉萨、海口及福州外的其他 28 座省会城市及直辖市，如能达到国标情景暴露水平，总共可避免 112357 例超额死亡。重庆、北京、成都、石家庄、天津、上海所获得的健康收益最大，分别可避免超额死亡 12036 例、8362 例、8250 例、8063 例、7825 例、7723 例。

## 2. 不同 $PM_{2.5}$ 浓度水平下每十万常住人口中的超额死亡情况

与最清洁的目标情景“最清洁情景”相比，2013 年浓度值水平下的 $PM_{2.5}$ 污染在石家庄造成了最多例超额死亡(研究关注的四种病因别超额死亡之和，下同)，石家庄也正是 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度值最高的城市。但城市每十万人口中的超额死亡人数排序与城市 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度排序并不完全相同，例如 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度排位前五位的都是北方城市，而每十万人口中超额死亡人数排位前五位的只有石家庄和济南两座北方城市，郑州和西安市 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度值分列第三和第三位，每十万人口中超额死亡人数的排位却都在第十位以后。这提示我们某些南方城市虽然 $PM_{2.5}$ 年均浓度相对不算高，人群健康水平受威胁情况却也不容忽视。31 座省会城市和直辖市平均的每十万人口中的超额死亡人

数为 89 例，其中约九成的城市（28 座）每十万人口中的超额死亡人数超过 50 例。海口、乌鲁木齐和拉萨每十万人口中的超额死亡人数最少，分别为 49 例、46 例、39 例。

在 21 座已经制定了明确的 2017 年 $PM_{2.5}$ 下降目标的城市中，如能达到 2017 情景下的暴露水平，平均每十万人口中，可避免 11 例超额死亡。21 座城市中的三分之二（14 座），每十万人口中可避免的超额死亡人数都在 11 例及以上。其中，每十万人口中可避免超额死亡人数最多的城市包括南昌、京津冀地区的三座城市北京、天津和石家庄，长三角地区的两座城市杭州和南京。

除拉萨、海口及福州外的其他 28 座省会城市及直辖市，如能达到国标情景暴露水平，平均每十万人口中，可避免 41 例超额死亡。每十万人口中可避免超额死亡人数在 50 例以上的城市包括（按人数由高到低）：石家庄、济南、长沙、成都、武汉、天津、合肥、南京、西安。

## 3. $PM_{2.5}$ 污染造成的超额死亡与吸烟导致的超额死亡人数比较

根据文献[39]报导，在 2005 年全中国共有 673000 例死亡（95%可信区间，下同：564700-781400）可被归因于吸烟。其中 80%为男性死亡。吸烟相关死亡的根本死因为：癌症 268200 例（214500-321900），心血管疾病 146200 例（79200-213100），呼吸系统疾病 66800 例（20300-113300）。2012 年中国卫生部发布的《中国吸烟危害健康报告》中报导说每年因吸烟导致死亡的人数已超过 100 万例。

本研究结果显示，2013 年在中国 31 个省会城市和直辖市，因长期暴露于 $PM_{2.5}$ 污染带来的长期人群健康损害所致的缺血性心脏病、脑血管病、肺癌和慢性阻塞性肺疾病致超额死亡人数总数为 256693 例，其 95%可信区间高限值达 366309 例。31 个省会城市和直辖市共包含常住人口 27320 万人（即本研究所涵盖的人口），而根据《2014 中国统计年鉴》，我国 2013 年城镇总常住人口为 73111.5 万人，即除去省会城市和直辖市外的其他地级市中还居住着约 45791 万人，是省会城市和直辖市人口的 1.67 倍。我国 2013、2014 两年均出现全国大规模大范围雾霾态势，地级市居民的 $PM_{2.5}$ 暴露不可忽略，根据人口比推算，2013 年全国所有城市因暴露于 $PM_{2.5}$ 污染带来的长期人群健康损害所致的上述四种疾病别超额死亡人数，实际很可能已经与吸烟致肺癌、心血管疾病、呼吸系统疾病后致死人数相当。还需注意的一点是，每年 100 万例吸烟导致的死亡是全中国的数值。全国抽样调查[40]结果显示，农村居民吸烟率高于城市居民，且农村居民吸烟率的下降趋势也低于城市居民吸烟率。因此，在城市中，$PM_{2.5}$ 污染带来的超额死亡率更应提起重视。

## 4. 本研究的局限性

本研究的仅涵盖了中国 31 座省会城市或直辖市的数据，尚不能完全揭示中国其他大城市和中小城市 $PM_{2.5}$ 对居民的健康损害情况。另外，由于获取相应数据资料的困难，致使我们无法获得某些城市某些变量 2013 年的数值。于是如本报告方法部分中所述，有时我们借助 2012 年的数据资料推算 2013 年的数值。

关于环境 $PM_{2.5}$ 暴露造成人群健康损害的阈值浓度问题，本研究中遵从 WHO 对其空气质量准则值的解释，认为年平均浓度在 $10\mu g/m^3$ 及以下的 $PM_{2.5}$ 暴露不对人群健康造成损害，而诸多国内外研究者发表的科研论文中（包括研究 $PM_{2.5}$ 短期急性健康效应的），都提及 $PM_{2.5}$ 对人群健康的损害是无阈值的，即极低浓度的环境 $PM_{2.5}$ 也依然有可能对暴露人群的健康水平造成损害。

选用缺血性心脏病、脑血管病、肺癌和慢性阻塞性肺疾病，是因为全球已发表的研究各种来源的 $PM_{2.5}$ 长期暴露致成年人群健康损害的文献中，该四种疾病与 $PM_{2.5}$ 相关；同时根据 2010 全球疾病负担报告，除了伤害，这四种疾病在我国人群死因的前 5 位，可以全面的反应 $PM_{2.5}$ 对于健康的主要影响，因此仅对缺血性心脏病、脑血管病、肺癌和慢性阻塞性肺疾病进行整合暴露-反应关系（Integrated Exposure-Response，IER）[38]的构建和计算其健康影响。

最后，本研究仍属于生态学研究的范畴，居民的个体信息均无从获得，生态学谬误可能存在。生态学研究以由各个不同情况的个体“集合”而成的群体（组）为观察和分析的单位，个体微观行为模式可能与群体宏观行为模式有重大区别，生态学谬误即根据集合单位的分析结果作出关于个体的判断，可能与个体真实情况不符。

## 5. 政策建议

**5.1** 空气污染是当今中国面临的一个严峻的环境问题，已经严重威胁到全国各地公众的健康。尽管过去两年已有一系列相关政策出台，但治理 $PM_{2.5}$ 污染的效果与公众的愿望仍差距较大，亟需在各方面增加力度。由于 $PM_{2.5}$ 的主要成因与化石能源尤其是煤炭的消费紧密相关，因此，建议政府应在十三五规划中出台包括控制煤炭消费总量在内的能源结构调整措施，加快 $PM_{2.5}$ 污染的治理进度，尽量降低公众因此而付出的健康代价。

**5.2** 基于各城市制定的 2017 年 $PM_{2.5}$ 改善目标给公众带来健康效益有限。因此建议 2015 年底的《大气污染防治行动计划》的中期评估成为全国各地重新调整和整理治霾目标和措施的契机，尽快制订科学合理的达到 PM2.5 年均值 35 g/m3 的逐年改善目标。但 35 也仍然不是雾霾治理的终点，2013 年已达标的城市，应制订以 WHO 空气质量准则值 10μg/m3 为目标的计划。让中国广大的公

众能尽快看到政府根治雾霾的决心和实际规划，尽快因此获得健康和长寿的实际效益。

**5.3** 目前京津冀、长三角和珠三角等区域较重视 $PM_{2.5}$ 的治理，《大气污染防治行动计划》中也提出对京津冀、长三角、珠三角的 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标进行考核。但其他区域，如太原、武汉、成都、西安等城市的公众健康同样面临 $PM_{2.5}$ 污染的威胁。因此建议在 2015 年《大气污染防治行动计划》的中期评估后，开始对所有城市的 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标进行考核，以加快全国范围的 $PM_{2.5}$ 污染治理进度。

**5.4** 目前，各地政府在制订大气污染治理政策时，普遍缺乏对公众健康因素的考虑。建议各地将保护公众健康作为政策制定的重要的考量因素。各个主要城市应尽快开展大气污染对城市居民健康效应，尤其是长期健康效应的影响评估，以作为政府进一步制定治霾相关政策定量标准的有效依据。

# 参考文献


[1]Liu Z, Hu B, Wang L, et al. Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM10 and PM2.5) at an urban site of Beijing: analyses from a 9-year study [J].Environmental Science and Pollution Research, 2014:1-16.

[2]Brook R D, Rajagopalan S, Pope C A, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease an update to the scientific statement from the American Heart Association[J]. Circulation, 2010, 121(21): 2331-2378.

[3]Martinelli N, Olivieri O, Girelli D. Air particulate matter and cardiovascular disease: a narrative review[J]. European journal of internal medicine, 2013, 24(4): 295-302.

[4]Jorgensen N W, Van Hee V C, Barr R G, et al. Vascular Responses to Long-and Short-Term Exposure to Fine Particulate Matter[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2012, 60(21):2158-2166.

[5]Brook R D, Franklin B, Cascio W, et al. Air pollution and cardiovascular disease A statement for healthcare professionals from the expert panel on population and prevention science of the American Heart Association[J]. Circulation, 2004, 109(21): 2655-2671.

[6]Miller K A, Siscovick D S, Sheppard L, et al. Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women[J]. New England Journal of Medicine, 2007, 356(5): 447-458.

[7]Madrigano J, Kloog I, Goldberg R, et al. Long-term exposure to PM2. 5 and incidence of acute myocardial infarction[J]. Environmental health perspectives, 2013, 121(2): 192-196.

[8]Fuks K, Moebus S, Hertel S, et al. Long-term urban particulate air pollution, traffic noise, and arterial blood pressure[J]. Environmental health perspectives, 2011, 119(12): 1706-1711.

[9]Chuang K J, Yan Y H, Chiu S Y, et al. Long-term air pollution exposure and risk factors for cardiovascular diseases among the elderly in Taiwan[J]. Occupational and environmental medicine, 2011, 68(1): 64-68

[10]Dockery D W, Pope C A, Xu X, et al. An association between air pollution and mortality in six US cities[J]. New England journal of medicine, 1993, 329(24): 1753-1759.

[11]Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. Jama, 2002, 287(9): 1132-1141.

[12]Crouse D L, Peters P A, van Donkelaar A, et al. Risk of nonaccidental and cardiovascular mortality in relation to long-term exposure to low concentrations of fine particulate matter: a Canadian national-level cohort study[J]. Environmental health perspectives, 2012, 120(5): 708-714.

[13]Gauderman W J, Avol E, Gilliland F, et al. The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age[J]. New England Journal of Medicine, 2004, 351(11): 1057-1067.

[14]Islam T, Gauderman W J, Berhane K, et al. The relationship between air pollution, lung function and asthma in adolescents[J]. Thorax, 2007,62(11): 957-963.

[15]Young M T, Sandler D P, DeRoo L A, et al. Ambient Air Pollution Exposure and Incident Adult Asthma in a Nationwide Cohort of US Women[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2014, 190(8): 914-921.

[16]Mukkannawar U, Sambhudas S, Juvekar S, et al. Indoor PM2. 5 levels in homes using different types of cooking fuels in a rural Indian population and it's association with COPD[J]. European Respiratory Journal, 2011, 38(55): 1033.

[17]Neupane B, Jerrett M, Burnett R T, et al. Long-term exposure to ambient air pollution and risk of hospitalization with community-acquired pneumonia in older adults[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2010, 181(1): 47-53.
[18]Kaji D A, Belli A J, McCormack M C, et al. Indoor pollutant exposure is associated with heightened respiratory symptoms in atopic compared to non-atopic individuals with COPD[J]. BMC pulmonary medicine, 2014, 14(1): 147.
[19]Lepeule J, Laden F, Dockery D W, et al. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard Six Cities study from 1974 to 2009[J]. 2012,120(7):965-970.
[20]Pope C A, Burnett R T, Turner M C, et al. Lung cancer and cardiovascular disease mortality associated with ambient air pollution and cigarette smoke: shape of the exposure-response relationships[J]. Environ Health Perspect, 2011, 119(11): 1616-1621.
[21]Turner M C, Krewski D, Pope III C A, et al. Long-term ambient fine particulate matter air pollution and lung cancer in a large cohort of never-smokers[J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2011, 184(12): 1374-1381.
[22]Katanoda K, Sobue T, Satoh H, et al. An association between long-term exposure to ambient air pollution and mortality from lung cancer and respiratory diseases in Japan. J Epidemiol, 2011,21:132-143
[23]Cesaroni G, Badaloni C, Gariazzo C, et al. Long-term exposure to urban air pollution and mortality in a cohort of more than a million adults in Rome. Environ Health Perspect, 2013,121:324-331.
[24]Kloog I, Melly S J, Ridgway W L, et al. Using new satellite based exposure methods to study the association between pregnancy pm2. 5 exposure, premature birth and birth weight in Massachusetts[J]. Environmental Health, 2012, 11(1): 1-8.
[25]Ha S, Hu H, Roussos-Ross D, et al. The effects of air pollution on adverse birth outcomes[J].Environ Res, 2014, 27(134): 198-204.
[26]Wilhelm M, Ritz B. Local variations in CO and particulate air pollution and adverse birth outcomes in Los Angeles County, California,USA [J]. Environ Health Perspect, 2005,113:1212-1221.
[27]Huynh M, Woodruff T J, Parker J D, et al. Relationships between air pollution And preterm birth in California[J].Paediatr Perinat Epidemiol, 2006, 20: 454-461.
[28]Xu X, Liu C, Xu Z, et al. Long-term exposure to ambient fine particulate pollution induces insulin resistance and mitochondrial alteration in adipose tissue[J]. Toxicological Sciences, 2011, 124(1): 88-98..
[29]Coogan P F, White L F, Jerrett M, et al. Air pollution and incidence of hypertension and diabetes mellitus in black women living in Los Angeles[J]. Circulation, 2012, 125(6): 767-772.
[30]Brook R D, Cakmak S, Turner M C, et al. Long-term fine particulate matter exposure and mortality from diabetes in Canada[J]. Diabetes care, 2013, 36(10): 3313-3320.
[31] Choi H, Shin D W, Kim W, et al. Asian dust storm particles induce a broad toxicological transcriptional program in human epidermal keratinocytes[J]. Toxicology letters, 2011, 200(1): 92-99.
[32] Krutmann J, Liu W, Li L, et al. Pollution and skin: From epidemiological and mechanistic studies to clinical implications[J]. Journal of dermatological science, 2014.
[33] Vierkötter A, Schikowski T, Ranft U, et al. Airborne particle exposure and extrinsic skin aging[J]. Journal of Investigative Dermatology, 2010, 130(12): 2719-2726.
[34] Vierkoetter A, Li M, Ma C, et al. Indoor air pollution from cooking with coal or firewood accelerates skin aging in northern Chinese women. J Invest Dermatol, 2014, 134: S51.
[35] Li M, Vierkötter A, Ding A, et al. Ethnic differences and environmental factors in skin aging. J Invest Dermatol 2014;134:S52.
[36] Larrieu S, Lefranc A, Gault G, et al. Are the short-term effects of air pollution restricted to cardiorespiratory diseases?[J]. American journal of epidemiology, 2009, 169(10): 1201-1208.

[37] Kim J, Kim EH, Oh I, et al. Symptoms of atopic dermatitis are influenced by outdoor pollution. J Allergy Clin Immunol, 2013,132(2): 495-498.
[38]Burnett R T, Pope III C A, Ezzati M, et al. An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure[J]. Environ Health Perspect, 2014,122(4):397-403.
[39]Gu D, Kelly TN, Wu X, et al. Mortality Attributable to Smoking in China [J]. N Engl J Med 2009, 360:150-9.
[40]Wang Z, Chu S, Chen S, et al. Analysis of Etiology and Risk Factors of in-patients with Hypertension [J]. Chin J Hypertension 2005, 13(8):504-9.