

## Assessment of Carcinogenic Health Risk of PM<sub>2.5</sub>-bound Benzo[a] Pyrene in Beijing

Yanjiao Chen, Sihong Chao, Jianwei Liu, Hongbin Cao

Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

### 北京市 PM<sub>2.5</sub> 载体苯并[a]芘的致癌风险评价

陈艳娇, 晁思宏, 刘建伟, 曹红斌

北京师范大学地理科学学部, 北京 100875, 中国

#### Abstract

Benzo[a] pyrene supported on PM<sub>2.5</sub> has strong carcinogenicity and threatens human lifespan. In this paper, by setting up sampling sites in Haidian District in Beijing, we continuously collected samples of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in 2016 and measured the concentration of BaP contained in the samples. In the meta-analysis of BaP epidemiology and animal toxicology data, a dose-response relationship was obtained. Then, calculating the number of newly-increased lung cancers' cases resulting from the respiratory exposure pathway, and combined with measured concentrations of BaP, the years of lived with disability is calculated with the result was 49.14 years. Based on the demographic data of Beijing, the average life expectancy loss due to lung cancer calculated using the life table method was 1.22 years, and the calculated years of life lost due to premature death was 63.68 years. Therefore, it can be estimated that the loss of healthy life caused by BaP was 112.82 years.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>, Benzo[a] pyrene, Disability-Adjusted Life Year, Carcinogenic Health Risk

#### 摘要

PM<sub>2.5</sub> 载体的苯并[a]芘具有强致癌性, 对人体寿命产生威胁。本文通过在北京市海淀区布设样点, 连续采集 2016 年大气 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物样品, 测定其载体的 BaP 浓度。荟萃分析 BaP 的流行病学及动物毒理学数据, 得到剂量效应关系, 然后结合实测的 BaP 浓度值, 计算呼吸暴露途径导致的新增

肺癌发病人数, 计算失能所致损失的健康寿命年, 结果为 49.14 年。基于北京市人口特征数据, 用生命表法计算得到因肺癌导致的平均预期寿命损失为 1.22 年, 计算得到因早逝所致损失的健康寿命年为 63.68 年。因此估算可得 2016 年 BaP 呼吸暴露造成的健康寿命损失为 112.82 年。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 苯并[a]芘; 伤残调整生命年; 致癌风险

#### 引言

近年来, 北京雾霾天气受到社会各界的广泛关注, 北京居民对雾霾所造成的身体健康危害颇为担忧。雾霾中的 PM<sub>2.5</sub> (粒径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ ) 由于粒径细小, 上面附着的各种有毒物质, 如重金属、有机物等, 能够随着呼吸进入呼吸道, 危害咽、喉、气管、支气管、肺等器官, 甚至进入血液损害全身其他脏器, 造成巨大的社会资源损失<sup>[1]</sup>。多环芳烃 (PAHs) 是一种常见的有毒有机物, 常产生于木材、石油等的不完全燃烧, 具有“致癌、致畸、致突变”的三致毒性<sup>[2,3]</sup>。BaP 是目前已经被证实的一种强致癌多环芳烃, 对多种动物物种的研究表明, BaP 在多个部位 (消化道, 肝, 肾, 呼吸道, 咽和皮肤) 均可通过所有接触途径致癌。此外, 涉及暴露于含 BaP 的多环芳烃混合物的职业, 如炼铝, 烟囱清扫, 煤气化, 煤焦油蒸馏, 焦炭生产, 钢铁铸造以及用沥青摊铺路面和屋顶等, 都有充分的致癌性证据。越来越多的职业健康研究表明持续暴露于 BaP 的持续暴露与肺癌发生率呈正相关<sup>[4]</sup>。BaP 能附着在 PM<sub>2.5</sub> 上, 随着呼吸进入人体, 产生健康危害, 尤其是对肺部损伤较大。因此本文旨在基于伤残调整生命年 (DALY) 计算并评价北京市 PM<sub>2.5</sub> 载体 BaP 对人群的致肺癌风险, 以为决策者或民众提供参考。

1. 研究内容

1.1 研究区概况

北京市是我国首都，是全国的政治、经济、文化交流中心。北京（115.7°-117.4°E，39.4°-41.6°N）位于北温带，由北部的燕山山脉和西部的太行山余脉构成“三面环山”的地形特征。北京为温带季风气候，四季分明，受夏季风影响夏季暖热多雨，冬季寒冷干燥，2016年降水669.1mm，年均温13.8℃，大风天数2天<sup>[5]</sup>。北京全市分为首都功能核心区（东城区、西城区），城市功能拓展区（朝阳区、丰台区、石景山区、海淀区），城市发展新区（房山区、通州区、顺义区、昌平区、大兴区），生态涵养发展区（门头沟区、怀柔区、平谷区、密云区、延庆区）。2016年北京市户籍人口达1362.9万<sup>[5]</sup>，机动车保有量571万辆，其中私人汽车452.04万辆<sup>[6]</sup>，为超大城市。

1.2 颗粒物样品采集

在海淀区北京师范大学南院核科楼楼顶（116.37°E,39.44°N）放置智能大流量空气颗粒物采样器（武汉天虹 TH-1000C，流量为1.05m<sup>3</sup>/min，切割粒径为2.5μm）采集PM<sub>2.5</sub>样品。采样滤膜选用石英纤维滤膜（203mm×254mm，Whatman）。每个样品采集时间为24h（9:00 am-次日9:00 am），2016年全年连续采样，除去大风、雨雪天气和仪器维护时间，共取得216个样品。样品存放于-18℃冰箱待用<sup>[7]</sup>。

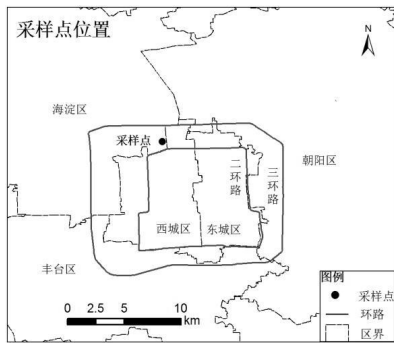


图1 采样点位置

1.3 样品前处理与 BaP 测定

从样品上切割直径为4.7cm的圆形滤膜，剪碎后放入聚四氟乙烯管中，加入回收率指示物，采用

微波萃取方法提取滤膜中的多环芳烃，萃取液抽滤转移后，通过真空旋转蒸发器（24℃，35rpm）浓缩至1-2mL，然后过混合硅胶柱分离提取，继续旋蒸至1-2mL，加入内标物，用GC-MS方法测定BaP。测定样品瓶中BaP与两种内标物的峰面积，用BaP及两种内标物质量浓度的比与两者峰面积的比值确定定量回归曲线。

实验中所用试剂及材料都严格遵循质量控制要求。为保证BaP测定方法的可靠性，在测定滤膜样品前做回收率预实验。且每批次测定样品中均加入4种回收率指示物，进行流程质量控制，回收率均在70%-130%范围内。故所得结果不需要进行校正。

1.4 可比较健康风险计算方法

目前的毒理学数据不足以量化多环芳烃对健康的影响。美国环保署（EPA）和加州环保局（CalEPA）各自出版长期接触浓度的卫生标准或指南，以期帮助减少癌症和非癌症的慢性危害<sup>[4,8-10]</sup>。与多环芳烃接触的危害可以量化为超过规定的非致癌标准的百分比，或人群癌症发生率增加的风险。这些方法虽然考虑了作为非致癌评价终点的疾病潜力和作为致癌评价终点的患病率，但是没有考虑疾病严重性。定量比较累积健康影响，需要包括疾病发生率和严重程度的综合指标，来评估大气多环芳烃的干预措施<sup>[11]</sup>。

DALY是世界卫生组织（WHO）推荐的用来表达由污染物引起的疾病负担的指标<sup>[12]</sup>，指从疾病发病到死亡所致损失的全部的健康寿命年，包括因为早逝所致损失的健康寿命年（years of life lost, YLL）和因为残疾（失能）所致损失的健康寿命年（years of lived with disability, YLD）两部分。DALY被广泛应用于水、土壤、大气等各介质中微生物、重金属、林丹、DDT、狄氏剂、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>等不同污染物对人体健康的影响评估<sup>[13-16]</sup>。大气污染主要以常规污染物为主，关于多环芳烃（PAHs）的DALY计算少见报道。

计算公式如下：

$$DALY = YLL + YLD \quad (1)$$

$$YLL = N \times Y \quad (2)$$

$$YLD = I \times DW \times L \quad (3)$$

N是某一疾病的死亡人数；Y是生命损失年数。I为发病人数；DW为失能权重，取值0-1之

间, 0 为健康, 1 为死亡; L 为某一疾病直到痊愈或死亡的平均病程时间。

本文主要计算 BaP 导致的肺癌风险, 因此 N 为肺癌死亡人数。耿振英收集 2003-2007 年确诊的 2440 例非小细胞肺癌病例并随访后发现, 年龄范围为 21-87 的 2440 名患者的生存时间分布范围为 1.9-120.8 个月<sup>[17]</sup>, 即最终患者皆因病死亡。因此本文假设由 BaP 导致的肺癌患者最终全部死亡, N=1; Y 结合北京市 2010 年人口普查得到的人口特征数据<sup>[18]</sup>和肺癌死亡人数, 经生命表法计算得到。新增肺癌发病率基于 EPA 关于 BaP 的毒性指南文件<sup>[19]</sup>中的呼吸暴露导致肺肿瘤的致癌单位风险, 结合实测的 BaP 浓度数据, 得到致癌风险的发病率。计算公式如 (4)、(5):

$$ILCR=EC \times IURBaP \quad (4)$$

$$EC= C \times EF \times ED / LT \quad (5)$$

其中, ILCR 为吸入含有 BaP 的 PM<sub>2.5</sub> 而产生的终生致癌风险, 当该值小于 1.0×10<sup>-6</sup>, 则人群致癌风险可忽略, 当该值大于 1.0×10<sup>-4</sup>, 则说明存在较为危险的致癌风险。IUR 为 BaP 的单位致癌风险值, 由于没有足够的化学特异性数据来评估年龄特异性易感性差异, “补充指南”<sup>[3]</sup>建议应用年龄相关调整因子 (ADAFs) 来估算早期 (<16 岁) 暴露于 BaP 的癌症风险, ADAFs 为 30 倍。因此成年人 IUR 取值 6×10<sup>-7</sup>[ng/m<sup>3</sup>]<sup>-1</sup> (EPA), 儿童取值 1.8×10<sup>-5</sup>[ng/m<sup>3</sup>]<sup>-1</sup>。EC 为暴露浓度, 单位是 ng/m<sup>3</sup>。C 为实测的外暴露浓度, 单位是 ng/m<sup>3</sup>。EF 为暴露天数, 单位是 d/a。ED 为暴露年限, 单位是 a, 成年人取值 30, 儿童取值 6。LT 为终生暴露时间, 单位是 a, 成年人取值 80×365, 儿童取值 6×365。

肺癌分期的 DW 由 WHO 疾病负担文件给出<sup>[20]</sup>, 平均病程时间 L 由已有文献得到<sup>[21]</sup>。由于不同分期肺癌发病人数占总人数不可获得, 因此只能默认不同分期的人数比例相同, 取不同分期失能权重的平均值进行计算, 取值情况见表 1。

表 1 肺癌不同阶段失能权重和病程时间

肺癌分期	DW	L(a)
I	0.15	2.17
II	0.15	
III	0.75	
IV	0.81	
DW 平均值	0.465	

## 2. 计算与讨论

### 2.1 致癌风险计算

#### 2.1.1 计算发病率

一般来说, 有毒污染物浓度越高, 导致的疾病发病率越高。2016 年北京市全年的 BaP 平均实测浓度为 10.205±18.548 ng/m<sup>3</sup>, 远超了欧盟规定的空气质量标准 (1 ng/m<sup>3</sup>)。将浓度 C 代入公式 (4)、(5), 计算得到儿童和成人的致癌概率分别为 1.32×10<sup>-5</sup> 和 2.20×10<sup>-6</sup>。致癌概率乘以北京市儿童和成人的人口数, 得到新增的肺癌发病人数。

#### 2.1.2 确定暴露人口特征

收集并处理全国及北京的统计年鉴数据, 整理得到 2016 年北京市分年龄人口数和全因死亡和因肺癌死亡数据, 如表 2 所示, 基于此表计算北京市人群因肺癌的平均预期寿命损失为 1.22 年, 乘以因 BaP 导致的肺癌死亡人数得到 YLL 为 63.68 年。

表 2 北京市人口特征数据表

年龄/ 岁	人口数	全因死亡人数	肺癌死亡人数
0	91033	103	0
[1-5]	452042	80	0
[5-10]	391474	34	0
[10-15]	376862	41	0
[15-20]	839551	104	1
[20-25]	2128710	225	4
[25-30]	1986892	256	10
[30-35]	1526794	253	20
[35-40]	1384157	502	42
[40-45]	1273356	848	100
[45-50]	1245654	1597	176
[50-55]	1033117	2355	445
[55-60]	920237	2898	545
[60-65]	565366	2922	728
[65-70]	392599	3595	800
[70-75]	404965	7259	1084
[75-80]	309217	9998	1104
[80-85]	159266	9435	817
[85-)	81923	9901	497
总计	15563215	52406	6373

#### 2.1.3 计算 YLDs 和 YLLs

将上述结果代入公式 (3), 计算得到因患癌损失的时间为 49.14 年, 因患癌早逝损失的时间为 63.68 年, 即暴露在 2016 年的 BaP 浓度下, 北京全

市损失的伤残调整生命年为 112.82 年。

表 3 DALY 计算结果

项目	(年)
YLD	49.14
YLL	63.68
DALY	112.82

### 2.2 讨论

计算过程中,由于北京市分年龄的肺癌死亡率数据缺失,改用全国城市的相应数据,用人口比例换算而来。但是北京作为我国的超大城市,医疗水平居于国内前列,肺癌死亡人口可能小于表 2 中所给值,因此可能会造成计算结果的过高估计。除此之外,在现实的医疗状况中,肺癌每个阶段的失能权重和病程持续时间各有差别,本文选取了较为客观合理的数值,但仍会有不确定性存在。

为了估算 PM<sub>2.5</sub> 载体 BaP 的健康风险,不应当只考虑肺癌这一种健康效应,还应考虑其他部位的肿瘤和非致癌的健康效应等等。但由于各个毒性数据库中一般只考虑毒物致敏性最强的健康危害,对其他危害影响的评估严重不足,剂量效应关系等存在缺失现象,这对完整计算一种有毒物质的对人体带来的疾病负担造成困难。通过了解 EPA 等部门组织计算参考浓度和单位致癌风险的模型方法,可以使得结果更加精确。除考虑众多健康效应之外,还应当考虑并发症、后遗症等健康效应存在重叠的地方,进行共病校正,避免过大估计健康损失。通过定量源解析分析各个排放源的污染物排放状况,再结合 DALY 指标计算每一个排放源对北京居民造成的健康影响,制定减排次序,还有助于更科学更健康地减排。

### 3. 结论

通过分析测定 2016 年北京全年的 PM<sub>2.5</sub> 载体 BaP 浓度,估算这一年暴露会造成的伤残调整寿命年寿命损失为 112.82 年。这一指标更加直观地表现出 BaP 对人体健康寿命造成的直接影响,对决策倾向具有重要意义。

### 参考文献

[1] Lv L, Li H, Yang J, A health-based economic assessment of PM<sub>2.5</sub> pollution in Chinese major cities, International Forum on Energy, Environment Science and Materials :1318 - 1320, 2015.

[2] Li X, Li P, Yan L, Chen J, Cheng T, Xu S, Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in fog-rain events, Journal of Environmental Monitoring, 13(11): 2988-2993,2011.

[3] Perera, FP, Tang, D, Rauh, V, Relationships among polycyclic aromatic hydrocarbon-DNA adducts, proximity to the World Trade Center, and effects on fetal growth, Environ Health Perspect5, 113: 1062-1067,2005.

[4] Toxicological Review of Benzo[a]pyrene [CASRN 50-32-8] Supplemental Information, EPA., 2017.

[5] 北京统计年鉴—2017. <http://tj.beijing.gov.cn/nj/main/2017-tjnj/zk/index.htm>.

[6] 中华人民共和国国家统计局.2016. <http://data.stats.gov.cn/search.htm?s=2017%E5%B9%B4%20%E5%8C%97%E4%BA%AC%20%E6%B1%BD%E8%BD%A6%E4%BF%9D%E6%9C%89%E9%87%8F>.

[7] 晁思宏,北京市大气颗粒物载体多环芳烃排放源的源解析和健康风险评价,北京师范大学,2017.

[8] Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Agency for Toxic Substances and Disease Registry,EPA,1995.

[9] Benzo[a]pyrene as A Toxic Air Contaminant. California Air Resources Board and the Office of Environmental Health Hazard-Assessment., CalEPA.,1994.

[10] Air Quality Guidelines for Europe. World Health Organization Regional Office for Europe Copenhagen., WHO, 2000.

[11] Logue J M, Price P N, Sherman M H, Singer B C. A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants in U.S. Residences , Environmental Health Perspectives,120(2): 216-222. 2012.

[12] 王斌,徐凌中,衡量疾病负担的新指标—DALY,中国卫生资源,5(5): 230-231,2002.

[13] Xiao S, An W, Chen Z, Zhang D, Yu J, Yang M. The burden of drinking water-associated cryptosporidiosis in China: The large contribution of the immune deficient population identified by quantitative microbial risk

- assessment, *Water Research*,46(13): 4272-4280, 2012.
- [14] Chatham-Stephens K, Caravano J, Ericson B, Sunga-Amparo J, Susilorini B, Sharma P, Landrigan P J, Fuller R. Burden of disease from toxic waste sites in India, Indonesia, and the Philippines in 2010, *Environmental Health Perspectives*,121(7): 791-796,2013.
- [15] Sakaguchi I, Inoue Y, Nakamura S, Kojima Y, Sasai R, Sawada K, Suzuki K, Takenaka C, Katayama A. Assessment of soil remediation technologies by comparing health risk reduction and potential impacts using unified index, disability-adjusted life years, *Clean Technologies and Environmental Policy*,17(6): 1-8,2015.
- [16] Cohen A J, Ross A H, Ostro B, Pandey K D, Krzyzanowski M, Künzli N, Gutschmidt K, Pope A, Romieu I, Samet J M. The global burden of disease due to outdoor air pollution, *Journal of Toxicology & Environmental Health Part A*,68(13-14): 1301-1307, 2005.
- [17] 耿振英,2440 例非小细胞肺癌临床分析.南开大学,2013.
- [18] 中国统计年鉴,2010. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2010/indexch.htm>
- [19] Executive Summary: Benzo[a]pyrene as a Toxic Air Contaminant, EPA, 1994.
- [20] Global Burden of Disease 2004 update: Disability weights for diseases and conditions, World Health Organization. 2004.
- [21] 谭雪芹,265 例非小细胞肺癌患者中医治疗生存期回顾, 成都中医药大学,2013.