

1990~2021中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担

董万国¹, 张晓宇², 高 健², 杨 旻^{2*}

¹安徽医科大学研究生院, 安徽 合肥

²安徽医科大学第二附属医院重症医学二科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月22日; 发布日期: 2026年2月28日

摘 要

目的: 分析1990~2021年我国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担水平及其变化趋势。方法: 本研究基于GBD 2021数据库提取相关数据, 采用Joinpoint回归模型计算估计年度变化百分率(EAPC)及95%置信区间(CI), 并与全球不同社会人口指数(SDI)地区对比。结果: 2021年, 我国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病年龄标准化死亡率与DALY率分别为98.55/10万(95%CI: 68.87~122.00)和1835.02/10万(95%CI: 1286.46~2255.64); 1990~2021年两者均呈明显上升态势, EAPC分别为1.71(95%CI: 1.28~2.13)和1.77(95%CI: 1.39~2.15)。2021年我国的疾病负担水平高于全球多数SDI地区。在人群分布方面, 男性的疾病负担整体高于女性。从疾病类型来看, 心血管疾病为首要的疾病负担来源, 糖尿病和肾脏疾病上升最快(死亡率EAPC = 4.92), 慢性呼吸系统疾病呈下降趋势(死亡率EAPC = -1.23)。疾病负担随年龄呈指数级上升, 70岁及以上老年人群2021年年龄标准化DALY率和死亡率反超1990年, 且该优势随年龄增长而扩大。结论: 我国环境颗粒物污染相关的非传染性疾病负担呈上升趋势, 且在在不同人群与疾病间差异显著, 整体已处于全球高位, 未来亟需采取精准治理与重点防控以降低负担。

关键词

环境颗粒物污染, 非传染性疾病, 疾病负担, 社会人口学指数

Burden of Noncommunicable Diseases Attributable to Ambient Particulate Matter Pollution in China, 1990~2021

Wanguo Dong¹, Xiaoyu Zhang², Jian Gao², Min Yang^{2*}

¹Graduate School, Anhui Medical University, Hefei Anhui

²The Second Department of Critical Care Medicine, The Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

*通讯作者。

文章引用: 董万国, 张晓宇, 高健, 杨旻. 1990~2021 中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 64-74. DOI: 10.12677/acm.2026.163763

Abstract

Objective: To analyze the burden of noncommunicable diseases attributable to environmental particulate matter pollution in China from 1990 to 2021 and its changing trends. **Methods:** Data were extracted from the GBD 2021 database. The Joinpoint regression model was used to calculate the estimated annual percentage change (EAPC) and 95% confidence interval (CI), with comparisons made across global regions with different Socio-Demographic Index (SDI) levels. **Results:** In 2021, China's age-standardized mortality rate and DALY rate attributable to environmental particulate matter pollution were 98.55/100,000 (95% CI: 68.87~122.00) and 1835.02/100,000 (95% CI: 1286.46~2255.64), respectively. Both metrics showed a significant upward trend from 1990 to 2021, with EAPCs of 1.71 (95% CI: 1.28~2.13) and 1.77 (95% CI: 1.39~2.15), respectively. China's disease burden in 2021 exceeded that of most SDI regions globally. In terms of population distribution, the overall disease burden was higher among males than among females. By disease category, cardiovascular diseases constituted the primary burden source, with diabetes and kidney diseases showing the fastest growth (mortality EAPC = 4.92), while chronic respiratory diseases exhibited a declining trend (mortality EAPC = -1.23). The disease burden increased exponentially with age. The age-standardized DALY rate and mortality rate for individuals aged 70 and above surpassed those of 1990 by 2021, with this advantage widening with increasing age. **Conclusion:** The burden of noncommunicable diseases associated with particulate matter pollution in China is on the rise, with significant variations across different populations and diseases. Overall, the burden has reached a high level globally, necessitating targeted governance and prioritized prevention and control measures to reduce it in the future.

Keywords

Ambient Particulate Matter Pollution, Noncommunicable Diseases, Disease Burden, Socio-Demographic Index

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

环境颗粒物(Particulate Matter, PM)污染是全球性重大公共卫生挑战, 全球疾病负担(Global burden of disease study, GBD)研究显示, 2021 年全球超 700 万人的死亡可归因于 PM 暴露, 使其成为主要环境风险因素之一[1]。这类污染源于化石燃料燃烧、工业生产等过程, 可穿透肺泡屏障进入血液循环, 对多器官造成损害[2]。

非传染性疾病(Noncommunicable Diseases, NCDs)是中国疾病负担的核心构成, 占总死亡人数的 88% 以上, 且受人口老龄化(65 岁及以上老年人口占比从 1990 年 5.6% 升至 2021 年 14.2%)和生活方式转变影响, 负担持续加重[1][3]。中国过去三十年工业化、城市化快速推进, 导致环境颗粒物污染长期处于较高水平, 尽管“大气十条”等治理政策有效降低了污染浓度, 但区域污染差异仍存, 污染与非传染性疾病的关联仍需系统评估[4]-[6]。

现有研究多聚焦单一疾病或短期暴露效应, 缺乏对 PM 相关 NCDs 长期(30 年)负担趋势及人群、疾

病异质性的全面分析,且较少结合全球不同社会人口指数(Social Indicators of Population, SDI)地区对比,难以支撑精准防控[1]。基于 GBD 2021 数据库的更新数据,本研究旨在系统分析 1990~2021 年中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担水平、变化趋势及分布特征,通过量化年龄标准化死亡率、DALY 率及 EAPC 等指标,明确主要负担疾病及驱动因素,为“健康中国 2030”非传染性疾病防治及环境政策制定提供循证依据。

2. 资料和方法

2.1. 资料来源

GBD 2021 数据库是由美国华盛顿大学健康指标和评估研究所创建的可视化数据库,其涵盖了 1990 年至 2021 年的 204 个国家和地区、371 种疾病和伤害、288 种死亡原因以及 88 种危险因素的发生率、死亡率、伤残调整寿命年(disability adjusted life year, DALY)等疾病负担指标。本研究基于 GBD 2021 数据库,提取了 1990~2021 年我国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病的死亡率及伤残调整生命年等数据资料进行分析,包括不同性别、各非传染性疾病及年龄段。此外,我们还计算了 SDI,SDI 是衡量一个社会经济发展水平的重要指标,涵盖了教育、收入水平和生育率等多维因素。SDI 的取值范围在 0 到 1 之间,值越高表示社会经济发展水平越高。根据 GBD 2021 研究的 SDI 数据,全球 204 个国家和地区被分为五个不同的 SDI 水平:高、中高、中、中低和低。

2.2. 统计学分析

采用 R 4.3.2 软件进行数据分析,采用 Joinpoint 回归模型基于对数线性模型进行分段回归,并采用蒙特-卡罗置换检验确定最优回归模型,计算整体的估计年度变化百分率(Estimated annual percent change, EAPC)以分析 1990~2021 年疾病负担变化趋势。其中,若 EAPC 及 95%CI 小于 0,则表示对应时间段内疾病负担呈下降趋势,大于 0 则表示上升趋势,若 95%CI 包含 0 则表示变化趋势不明显。

3. 结果

3.1. 中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担及变化趋势

1990~2021 年,全球不同社会人口指数水平地区归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病其年龄标准化死亡率呈现显著地区异质性。高 SDI 地区表现为显著下降趋势,1990 年年龄标准化死亡率为 47.93 (95%CI: 31.69, 66.49)/10 万,2021 年降至 15.03 (95%CI: 11.18, 19.09)/10 万, EAPC 为 -3.97 (95%CI: -4.10, -3.85),是所有 SDI 水平中降幅最大的地区,中高 SDI 地区同样呈下降态势。与高 SDI、中高 SDI 地区相反,中 SDI、中低 SDI 及低 SDI 地区的年龄标准化死亡率均呈上升趋势。其中,中低 SDI 地区上升幅度最为明显,1990 年年龄标准化死亡率为 38.73 (95%CI: 25.74, 54.27)/10 万,2021 年升至 62.36 (95%CI: 39.10, 86.73)/10 万, EAPC 为 1.91 (95%CI: 1.64, 2.19),而低 SDI 地区上升幅度相对平缓。2019~2021 年中国年龄标准化死亡率呈明显上升趋势,1990 年为 69.03 (95%CI: 32.67, 119.86)/10 万,2021 年升至 98.55 (95%CI: 68.87, 122.00)/10 万, EAPC 为 1.71 (95%CI: 1.28, 2.13)。2021 年中国年龄标准化死亡率显著高于 2021 年各 SDI 地区的年龄标准化死亡率水平,见表 1、图 1。

2019~2021 年全球不同 SDI 水平地区归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病,其年龄标准化 DALY 率的地区分布特征与年龄标准化死亡率趋势一致。高 SDI 地区年龄标准化 DALY 率降幅显著,1990 年为 988.24 (95%CI: 672.02, 1350.86)/10 万,2021 年降至 383.09 (95%CI: 289.82, 484.07)/10 万, EAPC 为 -3.27 (95%CI: -3.37, -3.18),中高 SDI 地区年龄标准化 DALY 率同样呈下降趋势。中 SDI、中低 SDI 及低 SDI 地区年龄标准化 DALY 率均呈上升趋势。中低 SDI 地区上升幅度最大,1990 年为 851.10 (95%CI: 566.69,

1207.00)/10 万, 2021 年升至 1386.35 (95%CI: 863.53, 1925.01)/10 万, EAPC 为 1.91 (95%CI: 1.65, 2.17); 低 SDI 地区上升幅度最小, 1990 年为 658.64 (95%CI: 435.61, 927.99)/10 万, 2021 年为 720.70 (95%CI: 472.10, 1026.53)/10 万, EAPC 为 0.62 (95%CI: 0.27, 0.96)。2019~2021 年中国年龄标准化 DALY 率呈显著上升趋势, 1990 年为 1266.07 (95%CI: 604.92, 2191.66)/10 万, 2021 年升至 1835.02 (95%CI: 1286.46, 2255.64)/10 万, EAPC 为 1.77 (95%CI: 1.39, 2.15)。2021 年中国年龄标准化 DALY 率高于所有 SDI 水平地区, 成为全球范围内该疾病负担较高的国家之一, 见表 1、图 2。

Table 1. Age-standardized mortality rates, DALY rates and their trends of noncommunicable diseases attributable to ambient particulate matter pollution globally in 1990 and 2021

表 1. 1990 年和 2021 年全球归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病年龄标准化死亡率、DALY 率及变化趋势

	标化死亡率/10 万			标化 DALYs 率/10 万年		
	1990	2021	EAPC	1990	2021	EAPC
全球	58.38 (41.39, 74.58)	51.52 (38.02, 62.90)	-0.29 (-0.41 to -0.17)	1181.99 (835.15, 1517.86)	1131.92 (824.33, 1371.94)	-0.04 (-0.16 to 0.08)
高 SDI 地区	47.93 (31.69, 66.49)	15.03 (11.18, 19.09)	-3.97 (-4.1 to -3.85)	988.24 (672.02, 1350.86)	383.09 (289.82, 484.07)	-3.27 (-3.37 to -3.18)
中高 SDI 地区	89.08 (62.34, 118.55)	61.23 (47.78, 74.38)	-1.2 (-1.41 to -1)	1717.00 (1197.36, 2298.55)	1248.19 (984.15, 1502.41)	-1.05 (-1.25 to -0.85)
中 SDI 地区	56.32 (36.95, 79.66)	76.85 (53.20, 93.59)	1.33 (1.15 to 1.51)	1158.85 (769.26, 1631.23)	1594.22 (1117.82, 1947.57)	1.31 (1.15 to 1.47)
中低 SDI 地区	38.73 (25.74, 54.27)	62.36 (39.10, 86.73)	1.91 (1.64 to 2.19)	851.10 (566.69, 1207.00)	1386.35 (863.53, 1925.01)	1.91 (1.65 to 2.17)
低 SDI 地区	29.83 (19.61, 42.07)	33.65 (22.11, 47.72)	0.8 (0.41 to 1.19)	658.64 (435.61, 927.99)	720.70 (472.10, 1026.53)	0.62 (0.27 to 0.96)
中国	69.03 (32.67, 119.86)	98.55 (68.87, 122.00)	1.71 (1.28 to 2.13)	1266.07 (604.92, 2191.66)	1835.02 (1286.46, 2255.64)	1.77 (1.39 to 2.15)

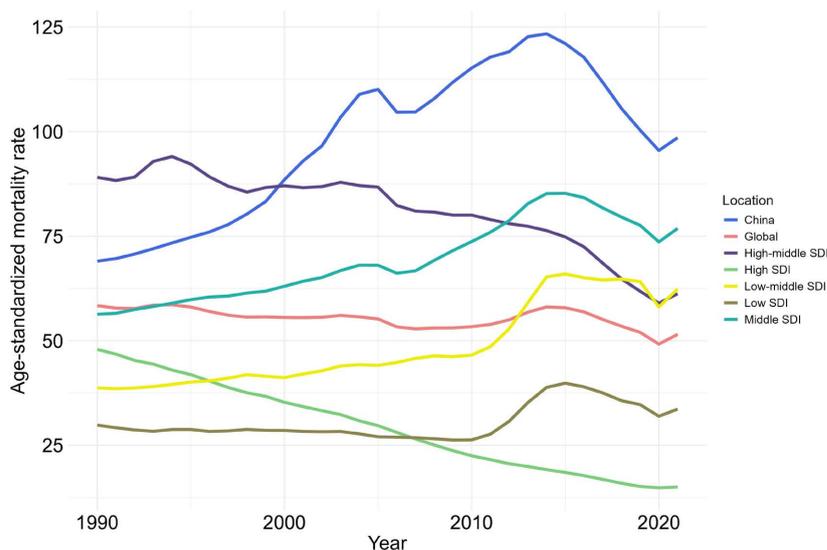


Figure 1. Trends in age-standardized mortality rates of noncommunicable diseases attributable to ambient particulate matter pollution globally, 1990~2021

图 1. 1990~2021 年全球归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病年龄标准化死亡率变化趋势

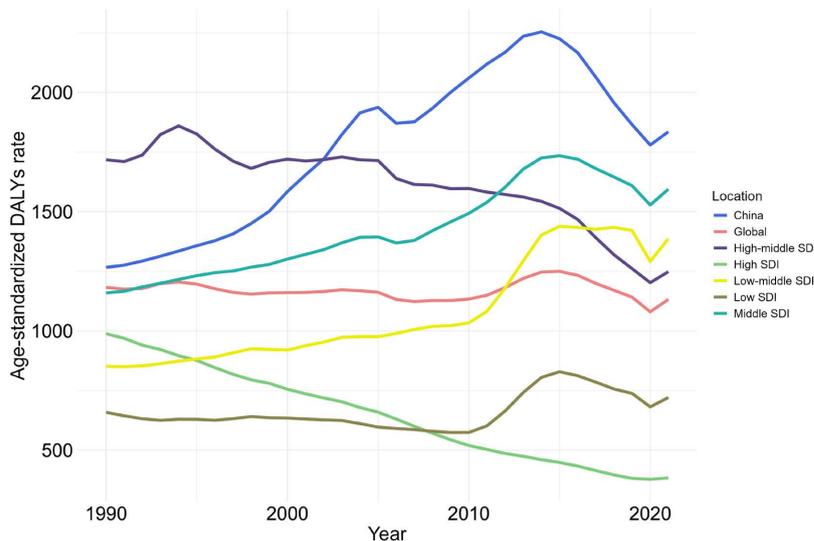


Figure 2. Trends in age-standardized DALY rates of noncommunicable diseases attributable to ambient particulate matter pollution globally, 1990~2021

图 2. 1990~2021 年全球归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病的年龄标准化 DALY 率变化趋势

3.2. 1990~2021 年中国不同性别归因于环境颗粒物污染的各非传染性疾病的负担及变化趋势

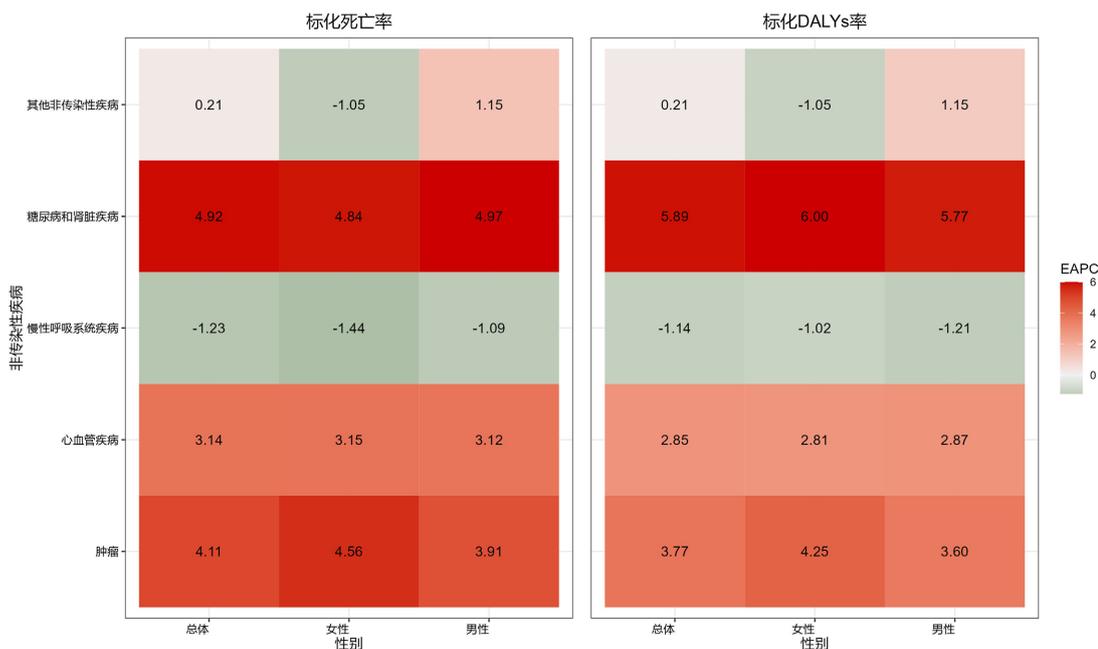


Figure 3. EAPC of specific noncommunicable diseases attributable to ambient particulate matter pollution by sex in China, 1990~2021

图 3. 1990~2021 年中国不同性别归因于环境颗粒物污染的各种非传染性疾病 EAPC

1990~2021 年中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病的各非传染性疾病中，心血管疾病是男女群体中疾病负担最高的类别，其年龄标准化死亡率、DALY 率均显著高于肿瘤、慢性呼吸系统疾病等其他类别。同时，性别差异表现为一致性特征，男性在各非传染性疾病类别的年龄标准化死亡率、DALY 率均高于女性。不同性别各疾病负担的 EAPC 差异显著，糖尿病和肾脏疾病是负担上升最快的疾病，其年龄标准化死亡

率 EAPC 总体为 4.92 (女性 4.84、男性 4.97), 年龄标准化 DALY 率 EAPC 总体为 5.89 (女性 6.00、男性 5.77), 男女均呈快速上升趋势。慢性呼吸系统疾病是唯一 EAPC 为负的疾病, 呈明显下降趋势, 年龄标准化死亡率 EAPC 总体为-1.23, (女性-1.44、男性-1.09); 年龄标准化 DALY 率 EAPC 总体为-1.14 (女性-1.02、男性-1.21)。肿瘤负担呈正增长, 且女性上升幅度更突出, 年龄标准化死亡率 EAPC 总体为 4.11 (女性 4.56、男性 3.91), 年龄标准化 DALY 率 EAPC 总体为 3.77 (女性 4.25、男性 3.60), 见图 3~5。

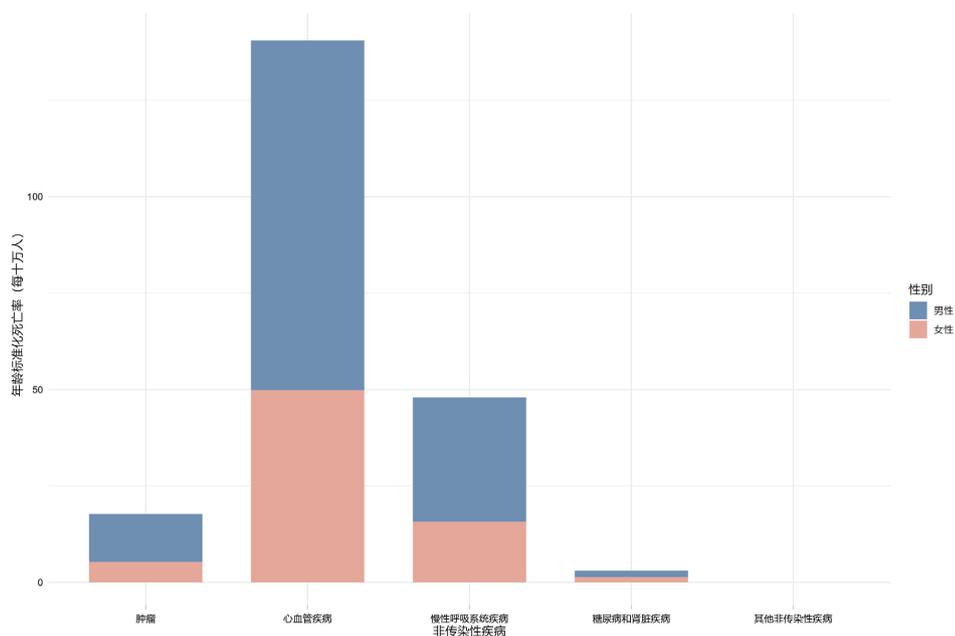


Figure 4. 2021 stacked bar chart of age-standardized mortality rates by different diseases for males and females in China
图 4. 2021 年中国男女不同疾病年龄标准化死亡率堆积柱形图

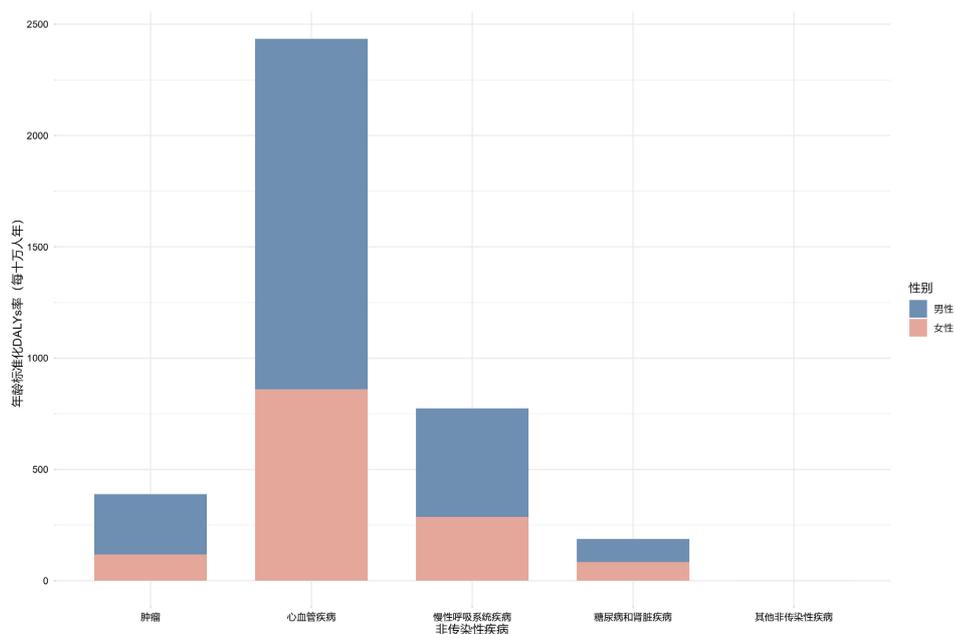


Figure 5. 2021 stacked bar chart of age-standardized DALYs rates for different diseases by males and females in China
图 5. 2021 年中国男女不同疾病年龄标准化率 DALYs 率堆积柱形图

3.3. 1990~2021 年中国不同年龄段归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担

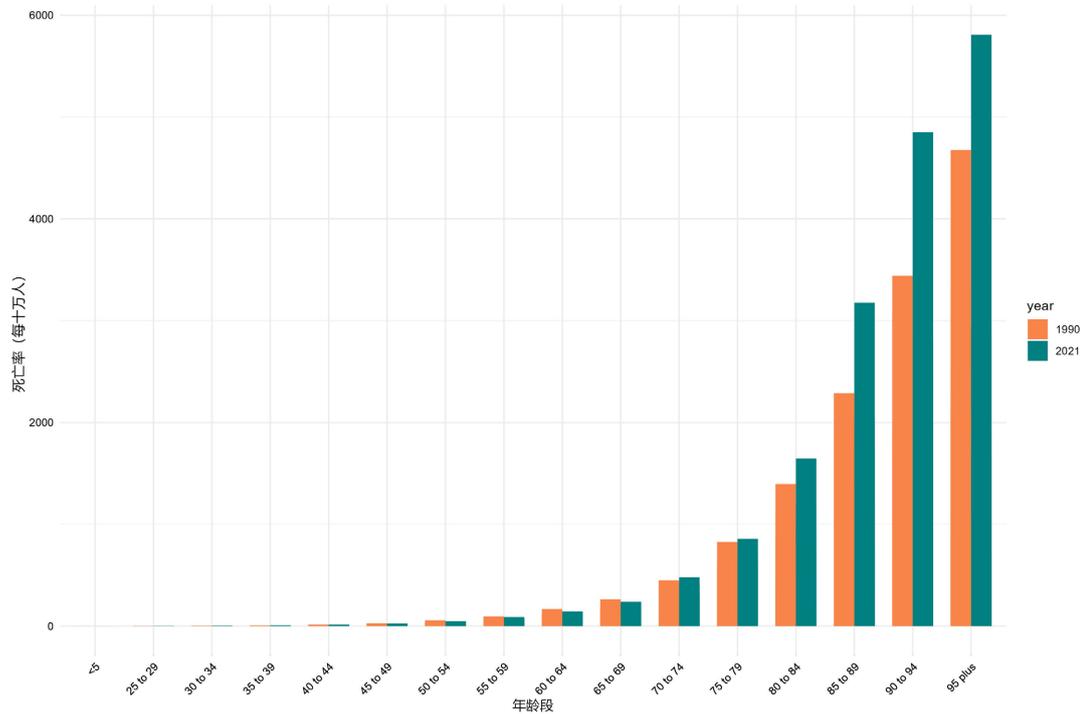


Figure 6. Comparative bar chart of age-standardized mortality rates by age group in China, 1990 and 2021
图 6. 1990 和 2021 年中国不同年龄段死亡率对比柱形图

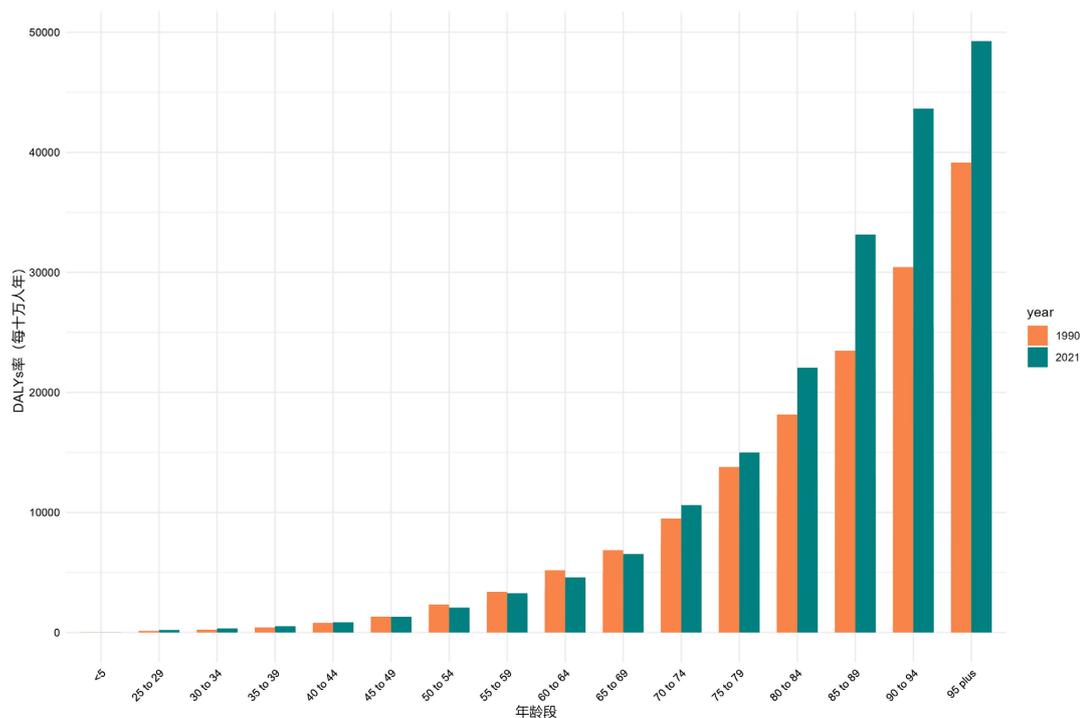


Figure 7. Comparative bar chart of age-standardized DALY rates by age group in China, 1990 and 2021
图 7. 1990 和 2021 年中国不同年龄段 DALY 率对比柱形图

中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担(死亡率和DALY率)呈现出明显的年龄依赖性特征,且随年龄增长呈指数级上升趋势。在死亡率方面,其上升的拐点靠后,主要集中在60岁以后。在低年龄段,归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病死亡率极低;在65岁至69岁区间,2021年的死亡率略低于1990年。进入70岁以后,2021年的年龄死亡率开始全面超过1990年。85岁以上各年龄组的死亡率在2021年均呈现出大幅增加的趋势,其中“95岁及以上”组的死亡率最高,远超1990年同期水平,见图6。在年龄标准化DALY率方面,其随年龄变化的模式与死亡率高度一致,负担在低龄及青壮年人群中维持在较低水平,但自50岁年龄组开始显著上升,并在高龄人群中达到最高水平。1990年与2021年不同年龄段的变化趋势存在明显的分化,在70岁以下的人群中(特别是50~69岁的中老年过渡期),2021年的年龄标准化DALY率相较于1990年有所下降或持平;在70岁及以上的老年人群中,2021年的年龄标准化DALY率反超1990年,且随着年龄的增长,两者的差距逐渐拉大,在“95岁及以上”年龄组达到峰值,2021年的年龄标准化DALY率显著高于1990年的水平,见图7。

4. 讨论

本研究基于GBD 2021数据库,系统揭示了1990~2021年中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担演变规律及人群、疾病分布异质性,为全球环境健康治理及我国“健康中国2030”战略落地提供了重要流行病学支撑。核心研究结果显示,我国相关疾病年龄标准化死亡率与DALY率均呈显著上升趋势(EAPC分别为1.71、1.77),2021年水平已高于全球多数SDI地区,且在性别、年龄及疾病类别上存在明显差异,这一特征与全球不同发展水平地区的负担演变规律既有共性,也凸显了我国特有的防控挑战。

全球不同SDI地区的负担演变呈现明显两极分化:高SDI地区凭借严格的环境管控措施(如化石燃料替代、工业排放限值设定)、健全的医疗保障体系及全民健康素养的提升,实现了颗粒物污染相关非传染性疾病负担的持续降低(年龄标准化死亡率EAPC=-3.97),这与既往GBD研究中高收入国家环境健康治理成效的结论相吻合。而中低SDI及低SDI地区因工业化进程滞后、环境治理能力不足,负担呈上升趋势,尤其中低SDI地区上升幅度最为突出(EAPC=1.91)。

中国作为中高SDI地区中唯一负担持续上升的国家,其独特性源于多重因素的协同作用。从污染暴露背景来看,1990~2021年我国工业化与城市化快速推进,能源消耗总量激增、机动车保有量大幅增长,导致环境颗粒物污染长期处于较高水平,尽管近年“大气十条”、“蓝天保卫战”等政策有效降低了污染浓度,但长期累积的暴露效应仍持续推高疾病负担[4][7]。与此同时,人口老龄化进程持续加速,65岁及以上老年人口占比从1990年的5.6%升至2021年的14.2%,而老年人群作为非传染性疾病的高危群体,其规模扩大进一步放大了污染相关健康损害[8]。此外,医疗水平的稳步提升延长了患者存活时间,使得年龄标准化DALY率等负担指标得以充分显现,这与全球中低SDI地区负担上升的主要驱动因素形成呼应,但中国的上升幅度更为显著,反映出污染暴露与人口结构的双重压力[9]。

男性各类非传染性疾病负担指标均显著高于女性,这一差异在各类非传染性疾病中均保持一致性,与全球多项环境颗粒物健康效应研究结论相符[10]。从暴露层面分析,男性更易从事建筑、交通运输、工业生产等户外职业,颗粒物暴露时长与强度显著高于女性,且男性吸烟、饮酒等不良生活习惯的流行率更高,这些因素与颗粒物污染存在协同损害效应,可通过加剧氧化应激、炎症反应放大对靶器官的损害[11]。从生理机制来看,女性雌激素可通过抑制核因子- κ B通路、改善血管内皮功能减轻颗粒物诱导的病理损伤,而男性缺乏这一保护机制,导致其对污染的易感性更高,这也解释了为何男性在心血管疾病、肿瘤等类别中的负担优势更为突出[12]。

疾病负担随年龄呈指数级上升,70岁及以上老年人群2021年年龄标准化死亡率和DALY率反超1990年,这一现象是“累积暴露效应”与“年龄相关生理衰退”共同驱动的结果[13]。老年人群心肺功

能、免疫功能显著下降,对颗粒物污染的耐受性降低,且多合并高血压、糖尿病等基础疾病,使得污染暴露后的发病风险和死亡风险大幅升高。同时,1990~2021年的三十年期间,老年人群长期暴露于环境颗粒物污染中,肺部及全身器官的累积性损伤逐渐显现;而医疗技术进步延长了老年人群的存活时间,进一步提高了疾病负担的量化水平[14]。值得关注的是,70岁以下人群(尤其是50~69岁)负担有所下降或持平,这可能与该年龄段人群健康意识提升、慢病规范化管理普及以及近年污染治理成效初显有关,提示环境干预与医疗保障的协同作用已产生积极效果。

心血管疾病作为男女群体中首要负担疾病,其核心机制体现在环境颗粒物可穿透肺泡屏障进入血液循环,通过诱导活性氧生成、损伤血管内皮功能、促进血栓形成等病理过程,诱发高血压、冠心病、脑卒中,这一机制已被大量流行病学和毒理学研究证实,与本研究心血管疾病持续高负担的结果形成呼应[15][16]。

糖尿病和肾脏疾病负担在所有非传染性疾病中上升最快(死亡率EAPC=4.92),这一趋势揭示了环境暴露与代谢紊乱之间复杂的交互机制。首先,越来越多的流行病学证据表明,PM_{2.5}不仅是呼吸系统刺激物,更是一种环境代谢干扰物,它可通过诱发全身性氧化应激和亚临床炎症,干扰胰岛素信号转导通路,进而导致胰岛素抵抗和糖脂代谢异常。其次,肥胖率的上升与环境污染形成了显著的“协同效应”[17][18]。中国过去三十年间肥胖流行率的激增为颗粒物致病提供了易感土壤,肥胖人群本就处于慢性低度炎症状态,PM_{2.5}的吸入进一步放大了这一炎症级联反应,加速了糖尿病的发生发展[19][20]。更为关键的是,“共病”模式在这一负担增长中起到了推波助澜的作用。糖尿病肾病是糖尿病最严重的并发症之一,长期暴露于PM_{2.5}可通过血管内皮损伤和肾小球血流动力学改变,直接加剧肾脏滤过功能的衰退;同时,糖尿病患者的高血糖环境削弱了机体对环境毒素的清除能力,使得“PM_{2.5}-糖尿病-慢性肾病”这一共病链条的健康损害呈倍数级放大[21][22]。因此,单纯针对单一疾病的防控已不足以应对当前的挑战,亟需建立跨学科的代谢性疾病环境综合干预策略。

慢性呼吸系统疾病是唯一呈下降趋势的疾病类别(死亡率EAPC=-1.23),这一结果与我国控烟政策推进、呼吸系统疾病规范化诊疗普及以及空气污染治理对呼吸道直接损伤的缓解密切相关,也与GBD 2021全球慢性呼吸系统疾病负担下降的总体趋势一致,提示针对性公共卫生干预可有效抵消部分环境污染物的有害影响。

值得深入探讨的是,尽管1990~2021年间中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病绝对负担呈上升趋势,但这并不意味着环境治理失效,而是“人口-环境”复杂博弈的结果。首先,人口老龄化是推高绝对负担的核心驱动力。本研究显示,非传染性疾病死亡率随年龄呈指数级上升,而中国快速的老龄化进程导致易感老年群体规模激增。这种人口结构的变迁,使得即便环境治理降低了单位致病风险(表现为年龄标准化率增速放缓),总的死亡人数仍因基数扩大而上升。其次,人口总量的持续增长也贡献了部分负担增量。这表明,老龄化与人口增长在一定程度上掩盖了“大气十条”等政策带来的健康红利。既往相关研究也指出,若剔除人口学因素,环境风险实际上已呈趋稳态势。因此,面对高负担现状,未来的治理策略需从单一“减排”向“适应老龄化”转变,重点加强老年人群的暴露防护,以抵消人口结构老化带来的挑战。

研究存在固有局限性。首先,GBD数据库的疾病负担估算依赖模型推导,部分数据基于间接估计,且我国部分偏远地区的流行病学监测数据相对有限,可能导致局部人群负担评估存在轻微偏差;其次,本研究未纳入个体水平的饮食、运动、遗传等危险因素,无法量化其与环境颗粒物污染的交互作用对疾病负担的影响;再次,暴露评估基于区域平均水平,未考虑职业暴露、室内外暴露差异等个体暴露异质性,可能导致暴露与疾病关联的误判;最后,研究聚焦于非传染性疾病总体及主要类别,未对具体疾病

(如不同亚型脑卒中、特定部位肿瘤)的负担变化进行细分分析,难以精准识别更具体的防控靶点。

综上,1990~2021年中国归因于环境颗粒物污染的非传染性疾病负担呈显著上升趋势,且存在明显的人群和疾病类别差异,当前已处于全球较高水平。未来需通过环境治理、精准防控、体系完善等综合措施遏制负担上升态势,同时开展更多机制性研究,为全球中高SDI地区环境健康治理提供中国方案。

基金项目

国家自然科学基金(编号:82072134);安徽省转化医学研究院科研基金(编号:2023zhyx-C64)。

参考文献

- [1] Brauer, M., Roth, G.A., Aravkin, A.Y., Zheng, P., Abate, K.H., Abate, Y.H., *et al.* (2024) Global Burden and Strength of Evidence for 88 Risk Factors in 204 Countries and 811 Subnational Locations, 1990-2021: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, **403**, 2162-2203. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(24\)00933-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(24)00933-4)
- [2] Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C.A., *et al.* (2018) Global Estimates of Mortality Associated with Long-Term Exposure to Outdoor Fine Particulate Matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115**, 9592-9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- [3] Liu, H., Yin, P., Qi, J. and Zhou, M. (2024) Burden of Non-Communicable Diseases in China and Its Provinces, 1990-2021: Results from the Global Burden of Disease Study 2021. *Chinese Medical Journal*, **137**, 2325-2333. <https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000003270>
- [4] Yu, T., Jiang, Y., Chen, R., Yin, P., Luo, H., Zhou, M., *et al.* (2025) National and Provincial Burden of Disease Attributable to Fine Particulate Matter Air Pollution in China, 1990-2021: An Analysis of Data from the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet Planetary Health*, **9**, e174-e185. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(25\)00024-5](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(25)00024-5)
- [5] Ali, M.A., Huang, Z., Bilal, M., *et al.* (2023) Long-Term PM_{2.5} Pollution over China: Identification of PM_{2.5} Pollution Hotspots and Source Contributions. *Science of the Total Environment*, **893**, Article ID: 164871.
- [6] 范丹, 叶昱圻, 王维国. 空气污染治理与公众健康——来自“大气十条”政策的证据[J]. 统计研究, 2021, 38(9): 60-74.
- [7] 靳景涛. 第三个“大气十条”聚焦 PM_{2.5} [J]. 生态经济, 2024, 40(2): 9-12.
- [8] Zhu, A., Kan, H., Shi, X., Zeng, Y. and Ji, J.S. (2024) Black Carbon Air Pollution and Incident Mortality among the Advance-Aged Adults in China: A Prospective Cohort Study. *The Journals of Gerontology, Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, **80**, glae302. <https://doi.org/10.1093/gerona/glae302>
- [9] Meng, X., Zhou, Y., Shi, S., Wang, S., Zaid, M., Zhang, H., *et al.* (2026) Mortality and Long-Term Exposure to Source-Specific PM_{2.5}: Evidence from a National Cohort Study in China. *The Lancet Planetary Health*, **10**, Article ID: 101400. <https://doi.org/10.1016/j.lanplh.2025.101400>
- [10] Brunekreef, B., Strak, M., Chen, J., *et al.* (2021) Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project. *Res Rep Health Eff Inst*, No. 208, 1-127.
- [11] Ji, W., Li, L., Cheng, Y., Yuan, Y., Zhao, Y., Wang, K., *et al.* (2025) Air Pollution, Lifestyle, and Cardiovascular Disease Risk in Northwestern China: A Cohort Study of over 5.8 Million Participants. *Environment International*, **199**, Article ID: 109459. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109459>
- [12] Levy, M.V., Fandl, H.K., Hijmans, J.G., Stockelman, K.A., Ruzzene, S.T., Reiakvam, W.R., *et al.* (2025) Effect of 17 β -Estradiol on Endothelial Cell Expression of Inflammation-Related MicroRNA. *MicroRNA*, **14**, 3-8. <https://doi.org/10.2174/0122115366320085240716180112>
- [13] 张文滨, 汪永杰, 令垚, 等. 1990-2021年中国帕金森病疾病负担分析和预测[J]. 中华疾病控制杂志, 2025, 29(1): 74-81.
- [14] Meng, K., Chen, X., Chen, Z. and Xu, J. (2025) Burden of Chronic Obstructive Pulmonary Disease in Adults Aged 70 Years and Older, 1990-2021: Findings from the Global Burden of Disease Study 2021. *PLOS ONE*, **20**, e0316135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316135>
- [15] Henning, R.J. (2024) Particulate Matter Air Pollution Is a Significant Risk Factor for Cardiovascular Disease. *Current Problems in Cardiology*, **49**, Article ID: 102094. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2023.102094>
- [16] Ding, R., Huang, L., Yan, K., Sun, Z. and Duan, J. (2024) New Insight into Air Pollution-Related Cardiovascular Disease: An Adverse Outcome Pathway Framework of PM_{2.5}-Associated Vascular Calcification. *Cardiovascular Research*, **120**,

- 699-707. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvae082>
- [17] Haberzettl, P., O'Toole, T.E., Bhatnagar, A. and Conklin, D.J. (2016) Exposure to Fine Particulate Air Pollution Causes Vascular Insulin Resistance by Inducing Pulmonary Oxidative Stress. *Environmental Health Perspectives*, **124**, 1830-1839. <https://doi.org/10.1289/ehp212>
- [18] Cai, C., Zhu, S., Qin, M., Li, X., Feng, C., Yu, B., *et al.* (2024) Long-Term Exposure to PM_{2.5} Chemical Constituents and Diabetes: Evidence from a Multi-Center Cohort Study in China. *The Lancet Regional Health—Western Pacific*, **47**, Article ID: 101100. <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2024.101100>
- [19] Chen, K., Shen, Z., Gu, W., Lyu, Z., Qi, X., Mu, Y., *et al.* (2023) Prevalence of Obesity and Associated Complications in China: A Cross-Sectional, Real-World Study in 15.8 Million Adults. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, **25**, 3390-3399. <https://doi.org/10.1111/dom.15238>
- [20] Chen, Y., Peng, Q., Yang, Y., Zheng, S., Wang, Y. and Lu, W. (2019) The Prevalence and Increasing Trends of Overweight, General Obesity, and Abdominal Obesity among Chinese Adults: A Repeated Cross-Sectional Study. *BMC Public Health*, **19**, Article No. 1293. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7633-0>
- [21] Kwon, S., Sim, H., Ko, A., Lee, W., Kim, H., Han, S.H., *et al.* (2025) Long-Term Impact of PM_{2.5} Exposure on Diabetic Kidney Disease Patients Considering Time-Dependent Medication Adjustment. *Clinical Kidney Journal*, **18**, sfaf216. <https://doi.org/10.1093/ckj/sfaf216>
- [22] Ran, J., Yang, A., Sun, S., Han, L., Li, J., Guo, F., *et al.* (2020) Long-Term Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Mortality from Renal Failure: A Retrospective Cohort Study in Hong Kong, China. *American Journal of Epidemiology*, **189**, 602-612. <https://doi.org/10.1093/aje/kwz282>