中山大学 中山眼科中心 ZHONGSHAN OPHTHALMIC CENTER, SUN YAT-SEN UNIVERSITY

全文收录于 Lighthouse Scholar

眼科学报

官网：journal.gzzoc.org.cn



doi: 10.12419/25110904
**View this article at:** https://doi.org/10.12419/25110904

• 全球疾病负担专栏 •

# 1990—2021 年全球、中国及高负担地区归因于室内空气污染的白内障疾病负担及趋势预测分析

肖宇琨#，黄韵致#，靳光明，王琦玮，刘臻臻

(中山大学中山眼科中心, 眼病防治全国重点实验室, 广东省眼科视觉科学重点实验室, 广州 510060)

## 文章亮点

**1. 关键发现**

• 关键发现：1990—2021 年，全球归因于室内空气污染的白内障年龄标准化伤残调整寿命年 (disability adjusted life years, DALYs) 率总体呈下降趋势，但疾病负担仍主要集中于南亚、东南亚、大洋洲和撒哈拉以南非洲等高负担地区。女性和 60 岁以上老年人群承担了更高的疾病负担。趋势预测显示，全球、中国、南亚及大洋洲相关疾病负担预计将继续下降，而东南亚和撒哈拉以南非洲地区未来可能出现回升趋势。

**2. 已知与发现**

• 既往研究提示，室内空气污染是白内障发生、发展的环境危险因素，可能通过氧化应激、炎症反应和抗氧化防御受损等机制影响晶状体透明性。本研究基于全球疾病负担研究 (Global Burden of Disease, GBD) 数据库，进一步从全球、区域、性别和年龄多维度分析室内空气污染归因白内障疾病负担的长期变化规律，并结合 Joinpoint 回归和自回归移动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型预测了未来趋势。

**3. 意义与改变**

• 本研究为识别归因于室内空气污染的白内障重点防控地区和高风险人群提供了流行病学证据。研究结果提示，在东南亚、撒哈拉以南非洲等高负担地区，应继续加强清洁能源推广、改善室内空气质量，并提高白内障筛查和手术服务可及性；在临床实践中，也可考虑将长期非清洁燃料暴露史纳入老年白内障患者的风险评估。

**收稿日期(Received):** 2025-11-12; **修订日期(Revised):** 2026-01-16; **接收日期(Accepted):** 2026-02-14

#为共同第一作者 (Co-first authors)

**通信作者(Corresponding authors):** 靳光明，Email：jingm@alumni.sysu.edu.cn；王琦玮，Email：wang_qiwei@126.com

**基金项目(Foundation items):** 眼病防治全国重点实验室课题基金资助 (2025QZLH05, 2025QNJS34)；广东省自然科学基金面上项目 (2023A1515011102)；广东省基础与应用基础研究基金联合基金 (2022A1515012102)。This work was supported by the Research Funds of the State Key Laboratory of Ophthalmology (2025QZLH05, 2025QNJS34); the General Program of Natural Science Foundation of Guangdong Province (2023A1515011102); the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2022A1515012102).

**作者贡献声明:** 1) 构思设计：肖宇琨，靳光明，王琦玮，刘臻臻；2) 行政支持：靳光明，王琦玮，刘臻臻；3) 提供研究材料：肖宇琨，黄韵致；4) 数据收集与汇总：肖宇琨，黄韵致；5) 数据分析与解读：所有作者；6) 稿件撰写：肖宇琨，黄韵致；7) 稿件最终修订与同意：所有作者

**Contributions:** Conception and design: XIAO Yukun, JIN Guangming, WANG Qiwei, LIU Zhenzhen; Administrative support: JIN Guangming, WANG Qiwei, LIU Zhenzhen; Provision of study materials: XIAO Yukun, HUANG Yunzhi; Collection and assembly of data: XIAO Yukun, HUANG Yunzhi; Data analysis and interpretation: All authors; Manuscript writing: XIAO Yukun, HUANG Yunzhi; Final approval of manuscript: All authors

电子全文

[摘　要] **目的：**基于 1990—2021 年全球、中国及高负担地区室内空气污染归因白内障的疾病负担进一步分析性别、年龄特异性分布规律，并预测 2022—2035 年疾病变化趋势，旨在为优化室内非清洁燃料控制策略和完善白内障精准防控体系提供多维度循证医学证据。**方法：**基于全球疾病负担研究 (Global Burden of Disease, GBD) 数据库，分析 1990—2021 年全球、中国及高负担地区归因于室内空气污染的白内障伤残调整寿命年 (disability adjusted life years, DALYs) 数据。采用 Joinpoint 回归分析计算年度变化百分比 (annual percent change, APC) 和平均年度变化百分比 (average annual percent change, AAPC)，使用自回归移动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型、线性模型预测白内障疾病负担 2022—2035 年变化趋势。**结果：**1990—2021 年全球范围归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率最高的地区是南亚、大洋洲、撒哈拉以南非洲和东南亚。相较 1990 年，2021 年全球归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率下降 38.42%。南亚地区的 DALY 损失最高，达 103 万人年，其次为东南亚，为 48.02 万人年。从性别上看，女性 DALYs 率普遍高于男性。全球归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率呈显著下降趋势 (AAPC 为−1.51%，95%CI: −1.65%~−1.37)。各地区≥60 岁的老年人群是归因于室内空气污染的白内障 DALYs 损失的主要群体。ARIMA 模型预测显示，全球、中国、南亚、大洋洲归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率 2022—2035 年将继续呈下降趋势，而东南亚和撒哈拉以南非洲地区将呈“U 型”回升趋势。**结论：**1990—2021 年，全球、中国、南亚、大洋洲归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率呈持续下降趋势，预计未来仍将延续，而东南亚、撒哈拉以南地区归因于室内空气污染白内障的年龄标准化 DALYs 率呈上升趋势，未来需重点关注。此外，需重点关注高负担地区女性和老年人群的白内障防控工作。将室内空气污染暴露史纳入老年白内障患者的临床风险评估具有重要诊疗意义。

[关键词] 室内空气污染；白内障；全球疾病负担；变化趋势；伤残调整寿命年

[中图分类号] R776.1，R181.3，R12　　[文献标志码] A

**引用本文:** 肖宇琨, 黄韵致, 靳光明, 王琦玮, 刘臻臻. 1990—2021 年全球、中国及高负担地区归因于室内空气污染的白内障疾病负担及趋势预测分析[J]. 眼科学报, 2026, 41(5): 333-345. DOI: 10.12419/25110904.

# Global and regional trends in cataract burden attributable to household air pollution, 1990–2021: comparative analysis across China and high-burden regions

XIAO Yukun#, HUANG Yunzhi#, JIN Guangming, WANG Qiwei, LIU Zhenzhen

*(State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science, Guangzhou 510060, China)*

**Abstract** **Objective**: To analyze the sex- and age-specific distribution of cataract attributable to household air pollution (HAP) globally, in China, and in high-burden regions (South Asia, Southeast Asia, Oceania, and sub-Saharan Africa) from 1990 to 2021, and to project trends through 2035. This study aims to provide epidemiological evidence to optimize clean fuel control strategies and inform targeted cataract prevention. **Methods**: Using data from the Global Burden of Disease (GBD) 2021, we analyzed disability-adjusted life years (DALYs) for cataract

attributable to HAP from 1990 to 2021 globally, in China, and across South Asia, Southeast Asia, Oceania, and sub-Saharan Africa. Joinpoint regression was used to calculate annual percentage change (APC) and average annual percentage change (AAPC). Autoregressive integrated moving average (ARIMA) and linear models were employed to project disease burden trends from 2022 to 2035. **Results**: In 2021, the highest age-standardized DALY rates (ASDRs) for HAP-attributable cataract were observed in South Asia, Oceania, sub-Saharan Africa, and Southeast Asia. Between 1990 and 2021, the global ASDR decreased by 38.42%. South Asia bore the highest absolute burden (1.03 million DALYs), followed by Southeast Asia (480,200 DALYs). Across all regions, DALY rates were consistently higher in females than in males. Globally, the ASDR exhibited a significant downward trend (AAPC: −1.51%, 95% CI: −1.65% to −1.37%). Older adults (aged ≥60 years) constituted the primary demographic bearing this burden across all regions. ARIMA projections indicate that the ASDR will continue to decline globally, as well as in China, South Asia and Oceania through 2035, whereas Southeast Asia and sub-Saharan Africa are projected to experience a U-shaped rebound. **Conclusions**: The global age-standardized burden of cataract attributable to HAP declined steadily from 1990 to 2021, a trend projected to continue. However, the anticipated rebound in Southeast Asia and sub-Saharan Africa warrants close attention. Prevention efforts should prioritize high-burden regions, namely Southeast Asia, South Asia, and sub-Saharan Africa, and target older adults, particularly female. Furthermore, integrating HAP exposure into cataract risk assessments for older patients has important clinical implications.

**Keywords**　household air pollution; cataract; global burden of disease; temporal trend; disability-adjusted life years

**Cite this article as:** XIAO Yukun, HUANG Yunzhi, JIN Guangming, WANG Qiwei, LIU Zhenzhen. Global and regional trends in cataract burden attributable to household air pollution, 1990–2021: comparative analysis across China and high-burden regions[J]. Yan Ke Xue Bao, 2026, 41(5): 333-345. DOI: 10.12419/25110904.

白内障是全球首位致盲性眼病，是导致视力损害的主要原因之一，严重降低患者的生活质量[1]。截至 2020 年，全球范围内有 1 520 万人因白内障导致失明[2]。既往研究表明，年龄、遗传、应用糖皮质激素、紫外线暴露、眼外伤是白内障最常见的风险因素[3]。近期研究发现，使用非清洁燃料造成的室内空气污染作为重要的环境危险因素，与包括白内障在内的多种疾病的发生、发展密切相关[4]。据世界卫生组织估计，全球约有 30 亿人仍在使用非清洁燃料进行烹饪和取暖，尤其是在东南亚、南亚和撒哈拉以南非洲地区，室内空气污染仍是许多疾病的重要风险因素[5]。长期暴露于室内空气污染环境中的颗粒物、多环芳烃等有害物质可能通过氧化应激、炎症反应等机制促进白内障的发生[6]。然而，目前关于室内空气污染对全球白内障疾病负担影响的系统性研究仍然有限。故本研究以室内空气污染为危险因素，以中国及高负担地区为主题，基于全球疾病负担 (global burden of disease，GBD) 数据库，系统分析 1990—2021 年全球室内空气污染归因于白内障的疾病负担及变化趋势。旨在为制定针对性的白内障防控策略提供科学依据。

## 1　资料和方法

### 1.1　数据来源

本研究数据来源于 GBD 2021 (https://ghdx.healthdata.org/gbd-2021)，该数据库由华盛顿大学健康计量与评价研究所 (Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME) 建立和维护，采用标准化方法学，系统收集和分析全球 204 个国家和地区的疾病负担数据，涵盖 369 种疾病和伤害的发病率、患病率、死亡率及伤残调整寿命年 (disability-adjusted life years, DALYs) 等核心指标[7]。本研究提取了 1990—2021 年全球、中国、南亚、东南亚、大洋洲、撒哈拉以南非洲地区归因于室内空气污染的白内障的 DALY 数据[8]，包括绝对数值和年龄标准化率，进一步分析了不同地区、性别、年龄阶段的白内障负担和变化趋势。GBD 将室内空气污染定义为在室内使用非清洁燃料进行烹饪、

照明、取暖等活动引起的空气污染[9]。

### 1.2 统计分析

本研究采用整合分析方法评估 1990—2021 年 DALY 数及其年龄标准化率的变化趋势，通过计算其变化率来衡量时间上的波动情况。变化率=(2021 年指标值−1990 年指标值)/1990 年指标值×100%。趋势分析采用 Joinpoint 5.0 软件[10]，以年份为自变量，年龄标准化 DALYs 率为因变量，通过回归分析评估各地区疾病负担时间趋势变化。计算年度变化百分比 (annual percent change, APC) 和平均年度变化百分比 (average annual percent change, AAPC) 和 95% 不确定性区间 (uncertainty interval, UI) 以评估不同时间段的变化速度。当 APC、AAPC 及其 95%CI 下限>0 时提示上升趋势，若上限<0 则判定为下降趋势。双侧检验水准 $\alpha$=0.05。

本研究基于 1990—2021 年全球、中国、南亚、东南亚、大洋洲、撒哈拉以南非洲地区归因于室内空气污染的白内障疾病负担数据，首先根据以下模型优选策略选取合适的趋势预测模型：1) 信息准则优先：优先选择赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 更低的模型，以平衡拟合精度与模型复杂度；2) 残差诊断：采用 Ljung-Box 检验对模型残差进行白噪声诊断。若 $P$<0.05 提示残差存在自相关，模型拟合不充分，予以排除；若 $P$>0.05 则提示残差为白噪声，模型有效。通过分别构建自回归移动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型[11]和线性回归 (Linear Regression) 模型，比较模型统计学指标选择最优预测方案,并选取最优方案预测 2022—2035 年各地区归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率趋势。

所有数据均从 GBD 官网以 csv 格式下载，使用 R Studio 4.3.2 进行统计分析及可视化。

## 2 结果

### 2.1 1990—2021 年归因于室内空气污染的白内障疾病负担地区差异分析

2021 年，GBD 全球 21 个地区中，归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率最高的地区前 5 位是大洋洲、南亚、西撒哈拉以南非洲地区和东撒哈拉以南非洲地区和东南亚 (表 1)。

2021 年，全球归因于室内空气污染的白内障 DALYs 总数为 195.63 万人年，其中男性 81.28 万人年，女性 114.35 万人年。与 1990 年相比，绝对 DALYs 数增长了 38.35%，从地区分布来看，南亚地区 DALYs 损失最高，达 103 万人年，占全球总数的 52.6%。中国次之，为 33.85 万人年 (17.3%)。撒哈拉以南非洲地区为 24.39 万人年 (12.5%)，较 1990 年增长了 73.01%，增长幅度最大。2021 年，全球归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率从 1990 年的 37.09/10 万下降至 22.84/10 万，降幅达 38.42%。东南亚地区从 1990 年的 88.56/10 万下降至 40.49/10 万，下降幅度最大，达 54.28%。大洋洲和非洲下降幅度最小，分别为 22.64% 和 22.31%(表 2 和图 1)。

### 2.2 1990—2021 年归因于室内空气污染的白内障 DALYs 率的变化趋势

Joinpoint 回归分析显示 (表 3)，1990—2021 年全球年龄标准化 DALYs 率呈持续下降趋势，AAPC 为 −1.51%(95%CI: −1.65%~−1.37%, $P$<0.001)。各地区均呈下降趋势：中国 AAPC 为−1.96%(95% CI: −2.15%~−1.77%)，南亚为−1.97%(95%CI: −2.16%~−1.78%)，东南亚为−2.15%(95%CI: −2.35%~−1.95%)，撒哈拉以南非洲为−0.93%(95%CI: −1.12%~−0.74%)，大洋洲为 −0.89%(95%CI: −1.05%~−0.73%)。其中，中国在 1995—2000 年出现短暂上升 (APC=5.36%)，随后持续下降。

### 2.3 2021 年归因于室内空气污染的白内障性别、年龄差异分析

在所有研究地区中，女性归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率均高于男性 (图 2)。2021 年全球女性年龄标准化 DALYs 率为 24.75/10 万，男性为 20.66/10 万。这一差异在中国和东南亚的女性中最为明显，分别为 19.14/10 万较男性的 14.23/10 万和 45.25/10 万较男性的 34.19/10 万。2021 年数据显示，各地区室内空气污染归因白内障的 DALYs 率均随年龄增长而显著上升。全球范围内，70~74 岁年龄组 DALYs 率达到峰值。南亚地区在各年龄组均表现出最高的 DALYs 率，特别是在老年人群中差异更为明显。

将 20 岁以上人群按照 5 年为组距进行分组，共得到 16 个年龄组，在此基础上进一步分析各年

**表 1　2021 年全球及 21 个地区归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率排名**

**Table 1　Ranking of age-standardized DALY rates of cataract attributable to household air pollution globally and across 21 regions in 2021**

| 排名 | 地区 | 年龄标准化DALYs率(/10万) | 95%CI |
|---|---|---|---|
| 1 | 大洋洲 | 75.98 | (−31.18, 142.86) |
| 2 | 南亚 | 75.62 | (−25.61, 149.39) |
| 3 | 西部撒哈拉以南非洲 | 70.91 | (−27.55, 134.48) |
| 4 | 东部撒哈拉以南非洲 | 63.92 | (−28.95, 115.91) |
| 5 | 东南亚 | 40.49 | (−11.50, 87.18) |
| 6 | 全球 | 22.84 | (−7.15, 47.05) |
| 7 | 拉丁美洲安第斯山脉 | 17.93 | (−3.21, 45.78) |
| 8 | 南部撒哈拉以南非洲 | 17.78 | (−4.07, 40.02) |
| 9 | 东亚 | 16.52 | (−3.85, 36.93) |
| 10 | 中部撒哈拉以南非洲 | 11.68 | (−4.59, 22.71) |
| 11 | 中亚 | 9.70 | (−1.68, 25.80) |
| 12 | 拉丁美洲中部 | 9.47 | (−1.80, 24.68) |
| 13 | 拉丁美洲热带 | 6.77 | (−1.13, 18.80) |
| 14 | 加勒比海地区 | 5.19 | (−1.72, 11.49) |
| 15 | 北非和中东 | 5.09 | (−1.18, 11.93) |
| 16 | 中欧 | 3.42 | (−0.60, 8.70) |
| 17 | 拉丁美洲南部 | 1.90 | (−0.24, 6.51) |
| 18 | 东欧 | 1.29 | (−0.16, 4.10) |
| 19 | 西欧 | 0.17 | (−0.02, 0.62) |
| 20 | 澳大拉西亚 | 0.16 | (−0.02, 0.55) |
| 21 | 高收入亚太地区 | 0.09 | (−0.01, 0.32) |
| 22 | 高收入北美地区 | 0.06 | (−0.01, 0.23) |

DALYs：伤残调整寿命年；CI：置信区间。

DALYs: disability-adjusted life years; CI: confidence interval

**表 2 1990—2021 年归因于室内空气污染的白内障疾病负担情况**

**Table 2 Disease burden of cataract attributable to household air pollution, 1990–2021**

| 项目 | 1990年 | | | 2021年 | | | 变化率/% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 合计 | 男性 | 女性 | 合计 | 男性 | 女性 | 合计 | 男性 | 女性 |
| DALYs数(万人年) | | | | | | | | | |
| 全球 | 141.4 | 62.09 | 79.32 | 195.63 | 81.28 | 114.35 | 38.35 | 30.92 | 44.17 |
| 中国 | 22.79 | 9.25 | 13.55 | 33.85 | 13.22 | 20.64 | 48.53 | 42.93 | 52.35 |
| 南亚 | 70.79 | 33.04 | 37.75 | 103.00 | 44.40 | 58.60 | 45.50 | 34.39 | 55.23 |
| 撒哈拉以南非洲 | 14.10 | 6.06 | 8.03 | 24.39 | 10.01 | 14.38 | 73.01 | 65.10 | 78.99 |
| 东南亚 | 40.43 | 16.32 | 24.88 | 48.02 | 18.67 | 29.69 | 18.75 | 14.38 | 19.34 |
| 大洋洲 | 1.33 | 0.97 | 1.17 | 1.62 | 1.05 | 1.18 | 21.69 | 8.47 | 0.85 |
| 年龄标准化DALYs率(/10万) | | | | | | | | | |
| 全球 | 37.09 | 36.90 | 37.66 | 22.84 | 20.66 | 24.75 | −38.42 | −44.02 | −34.28 |
| 中国 | 33.53 | 28.75 | 36.97 | 16.98 | 14.23 | 19.14 | −49.37 | −50.49 | −48.24 |
| 南亚 | 142.40 | 127.29 | 158.60 | 75.62 | 67.59 | 83.05 | −46.90 | −46.91 | −47.63 |
| 撒哈拉以南非洲 | 73.15 | 64.84 | 80.47 | 55.39 | 50.37 | 59.72 | −24.27 | −22.31 | −25.79 |
| 东南亚 | 88.56 | 75.06 | 99.08 | 40.49 | 34.19 | 45.25 | −54.28 | −54.45 | −54.34 |
| 大洋洲 | 96.41 | 87.18 | 105.60 | 75.98 | 70.48 | 81.69 | −21.19 | −19.16 | −22.64 |

DALYs：伤残调整寿命年。

DALYs: disability-adjusted life year.

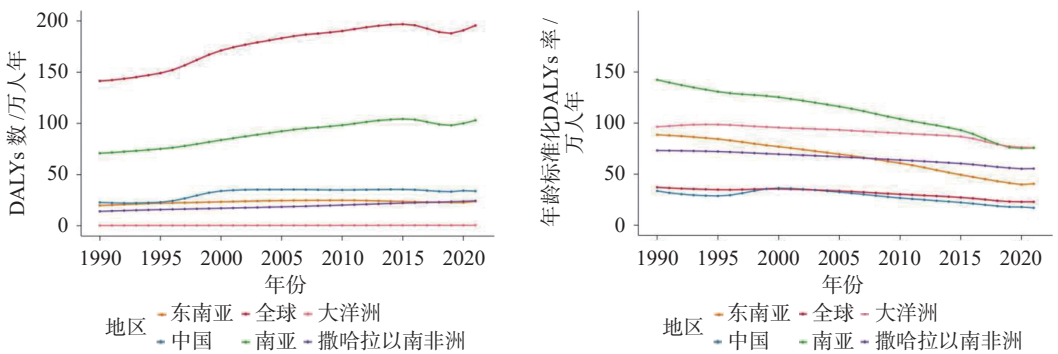



**图 1 1990—2021 年归因于室内空气污染的白内障负担变化趋势**

**Figure 1 Trends in the burden of cataract attributable to household air pollution, 1990–2021**

**表 3　1990—2021 年归因于室内空气污染的白内障年龄标准化率变化趋势 (Joinpoint 回归分析)**

**Table 3　Trends in age-standardized DALY rates of cataract attributable to household air pollution from 1990 to 2021: Joinpoint regression analysis**

| 全球 | | | 中国 | | | 南亚 | | | 东南亚 | | | 撒哈拉以南非洲 | | | 大洋洲 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 时间段 | APC/% | *P*值 | 时间段 | APC/% | *P*值 | 时间段 | APC/% | *P*值 | 时间段 | APC/% | *P*值 | 时间段 | APC/% | *P*值 | 时间段 | APC/% | *P*值 |
| 1990—1992年 | −1.99 | <0.001 | 1990—1992年 | −5.42 | <0.001 | 1990—1993年 | −1.91 | <0.001 | 1990—1993年 | −0.78 | <0.001 | 1990—1995年 | −0.51 | <0.001 | 1990—1995年 | −0.20 | <0.001 |
| 1992—1996年 | −1.06 | <0.001 | 1992—1995年 | −2.59 | <0.001 | 1993—1996年 | −1.42 | <0.001 | 1993—1996年 | −1.35 | <0.001 | 1995—1999年 | −0.70 | <0.001 | 1995—1999年 | −0.62 | <0.001 |
| 1996—2000年 | 0.57 | <0.001 | 1995—2000年 | 3.85 | <0.001 | 1996—2000年 | −0.75 | <0.001 | 1996—2006年 | −2.06 | <0.001 | 1999—2005年 | −0.57 | <0.001 | 1999—2005年 | −0.68 | <0.001 |
| 2000—2005年 | −1.09 | <0.001 | 2000—2005年 | −2.04 | <0.001 | 2000—2005年 | −1.64 | <0.001 | 2006—2011年 | −2.87 | <0.001 | 2005—2013年 | −1.11 | <0.001 | 2005—2013年 | −0.90 | <0.001 |
| 2005—2014年 | −2.12 | <0.001 | 2005—2014年 | −3.99 | <0.001 | 2005—2015年 | −2.11 | <0.001 | 2011—2016年 | −4.12 | <0.001 | 2013—2016年 | −1.33 | <0.001 | 2013—2016年 | −0.93 | <0.001 |
| 2014—2019年 | −3.33 | <0.001 | 2014—2019年 | −4.77 | <0.001 | 2015—2019年 | −4.72 | <0.001 | 2016—2019年 | −4.91 | <0.001 | 2016—2019年 | −2.09 | <0.001 | 2016—2019年 | −2.36 | <0.001 |
| 2019—2021年 | −0.48 | <0.001 | 2019—2021年 | −0.68 | <0.001 | 2019—2021年 | −0.91 | <0.001 | 2019—2021年 | −1.38 | <0.001 | 2019—2021年 | −0.43 | <0.001 | 2019—2021年 | −1.10 | <0.001 |
| AAPC(%, 95%CI) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1990—2021年 | −1.51 (−1.65, −1.37) | <0.001 | 1990—2021年 | −1.96 (−2.15, −1.77) | <0.001 | 1990—2021年 | −1.97 (−2.16, −1.78) | <0.001 | 1990—2021 | −2.15 (−2.35, −1.95) | <0.001 | 1990—2021年 | −0.93 (−1.12, −0.74) | <0.001 | 1990—2021年 | −0.89 (−1.05, −0.73) | <0.001 |

各时间段为 Joinpoint 回归模型识别的趋势分段，相邻时间段共享的年份为模型识别的转折点，并不表示该年份被重复分组。不同地区分别进行 Joinpoint 回归分析，因此转折点年份可能不同。APC:年度变化百分比；AAPC:平均年度变化百分比；DALY:伤残调整寿命年。

The time intervals are trend segments identified by Joinpoint regression. Shared years between adjacent intervals represent joinpoints and do not indicate duplicate grouping. Joinpoint regression was performed separately for each region, so the identified joinpoints may differ across regions. APC: annual percent change; AAPC: average annual percent change; DALY: disability-adjusted life year.

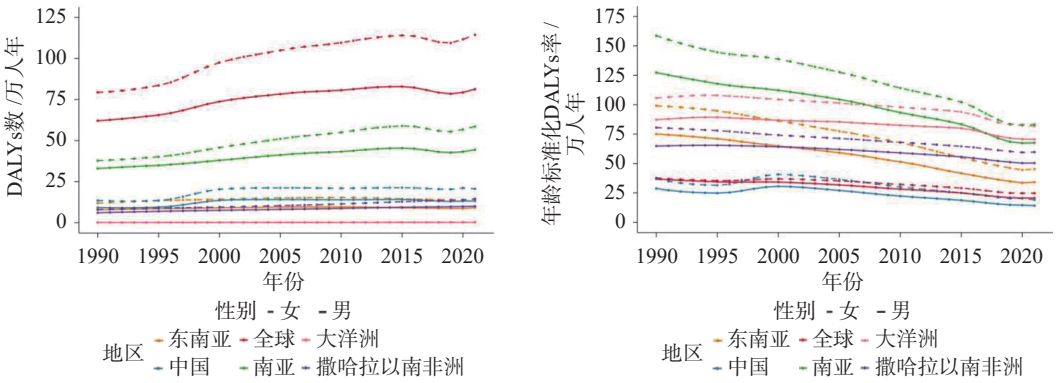



**图 2 1990—2021 年不同性别归因于室内空气污染的白内障负担变化趋势**

**Figure 2 Trends in the burden of cataract attributable to household air pollution by sex, 1990–2021**

龄组的 DALYs 损失差异 (图 3)。全球 DALYs 损失占比最高的年龄组为 70~74 岁 (16.62%)、65~69 岁 (15.28%) 和 75~79 岁 (14.89%)，其中 60 岁以上合计占比为 78.25%。中国 70~74 岁年龄组占比最高 (17.44%)，其次为 75~79 岁年龄组 (16.68%)、65~69 岁年龄组 (14.45%)，60 岁以上年龄组合计占比 83.50%。南亚地区 70~74 岁年龄组占比最高 (17.54%)，其次为 65~69 岁年龄组 (16.51%)。东南亚地区 70~74 岁年龄组占比最高 (15.79%)，其次为 65~69 岁年龄组 (14.49%)。撒哈拉以南非洲地区 65~69 岁年龄组占比最高 (13.62%)，其次为 70~74 岁年龄组 (13.53%)。大洋洲地区 65~69 岁年龄组占比最高 (14.94%)。

### 2.4 ARIMA 模型预测 2022—2035 年归因于室内空气污染的白内障年龄标准化率趋势

基于 AIC 准则和残差诊断结果，ARIMA 模型被确定为所有地区的最佳预测模型 (表 4)。ARIMA 模型预测结果显示 (图 4 和表 5)，2022—2035 年全球及大多数地区的归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率将继续保持下降趋势。中国下降最为显著，预计将从 2021 年的 16.98/10 万下降至 2035 年的 4.74/10 万，降幅达 69.79%。全球、南亚及大洋洲归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率亦呈现稳步下降趋势，降幅分别为 30.05%、39.83% 和 16.88%。东南亚和撒哈拉以南非洲地区归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率预计在 2022 年触底，随后回升，预计 2035 年分别达到 74.09/10 万和 73.54/10 万，增幅分别达到 72.74% 和 31.74%。

## 3 讨论

为了明确室内空气污染造成的白内障负担，本研究基于全球疾病负担数据，系统分析了 1990—2021 年全球、中国、南亚、东南亚、大洋

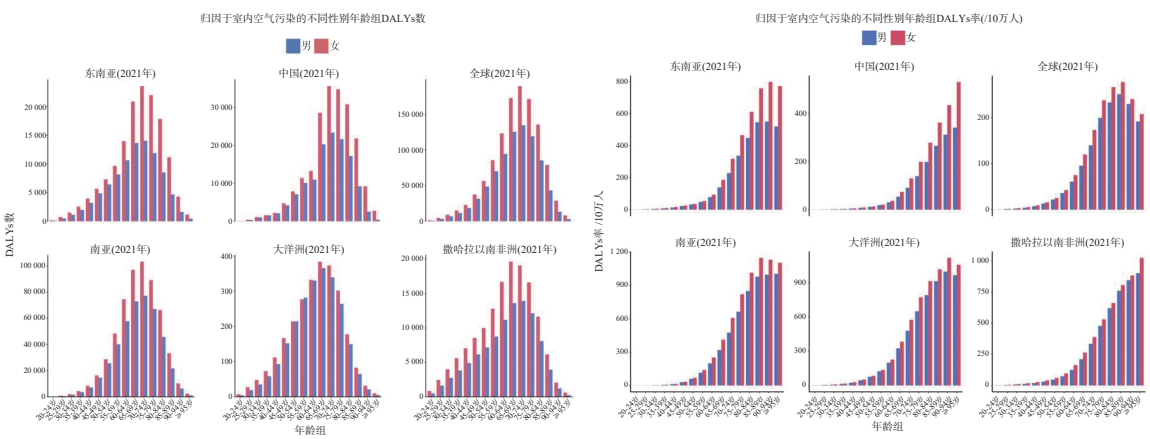



**图 3 1990—2021 年不同年龄性别归因于室内空气污染的白内障负担变化趋势**

**Figure 3 Trends in the burden of cataract attributable to household air pollution by age and sex, 1990–2021**

**表 4　基于 AIC 优先结合残差诊断的模型选择**

**Table 4　Model selection based on the Akaike information criterion (AIC) and residual diagnostics**

| 地区 | 线性模型AIC | ARIMA模型_AIC | 线性模型*P*值 | ARIMA模型*P*值 | 模型选择 |
|---|---|---|---|---|---|
| 全球 | 118.99 | −39.57 | <0.001 | 0.753 | ARIMA 模型(线性模型残差不合格) |
| 中国 | 175.83 | 35.51 | <0.001 | 0.896 | ARIMA 模型(线性模型残差不合格) |
| 南亚 | 167.70 | 35.53 | <0.001 | 0.587 | ARIMA 模型(线性模型残差不合格) |
| 东南亚 | 133.67 | 35.16 | <0.001 | 0.988 | ARIMA 模型(线性模型残差不合格) |
| 大洋洲 | 153.33 | 15.05 | <0.001 | 0.354 | ARIMA 模型(线性模型残差不合格) |
| 撒哈拉以南非洲 | 88.67 | −14.83 | <0.001 | 0.991 | ARIMA 模型(线性模型残差不合格) |

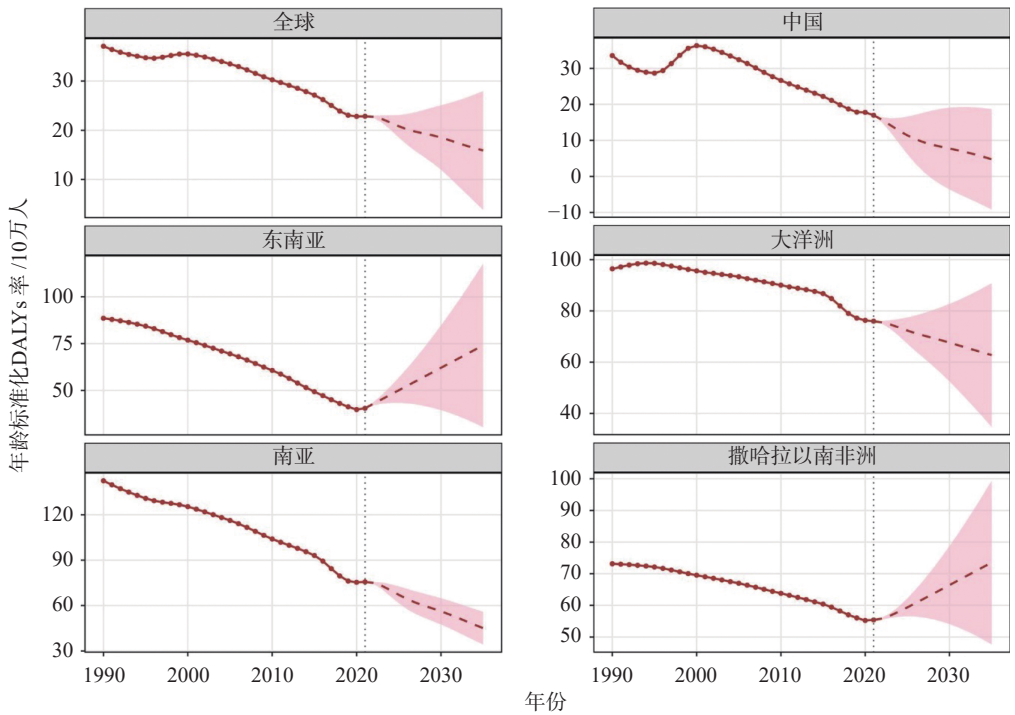



**图 4　2022—2035 年归因于室内空气污染的白内障疾病负担的未来预测模型**

**Figure 4　Projected trends in the burden of cataract attributable to household air pollution, 2022–2035**

洲、撒哈拉以南非洲地区归因于室内空气污染的白内障疾病负担及其变化趋势。全球归因于室内空气污染的白内障的年龄标准化 DALYs 率呈下降趋势。南亚地区归因于室内空气污染的白内障 DALYs 损失最高，大洋洲和撒哈拉以南非洲地区负担下降幅度最小。经性别、年龄差异分析，女性归因于室内空气污染的白内障负担高于男性；60 岁以上人群为 DALYs 损失的主要人群。

2021 年，全球暴露于室内空气污染的白内障负担最重的前 5 个地区为大洋洲、南亚、西撒哈拉以南非洲地区和东撒哈拉以南非洲地区和东南亚。在这些地区，由于医疗卫生资源较为匮乏、健

**表 5 2022—2035 年归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率的 ARIMA 模型预测值**

**Table 5 ARIMA projections of age-standardized DALY rates of cataract attributable to household air pollution, 2022–2035**

| 年份 | 年龄标准化DALYs率(/10万人) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 全球 | 中国 | 东南亚 | 南亚 | 大洋洲 | 撒哈拉以南非洲 |
| 2022 | 22.73 | 15.69 | 42.89 | 74.97 | 75.52 | 55.82 |
| 2023 | 22.29 | 14.2 | 45.29 | 73.04 | 74.67 | 56.8 |
| 2024 | 21.59 | 12.71 | 47.69 | 70.21 | 73.53 | 58.02 |
| 2025 | 20.82 | 11.38 | 50.09 | 67.12 | 72.33 | 59.36 |
| 2026 | 20.17 | 10.29 | 52.49 | 64.28 | 71.26 | 60.74 |
| 2027 | 19.71 | 9.43 | 54.89 | 61.92 | 70.34 | 62.15 |
| 2028 | 19.35 | 8.76 | 57.29 | 59.94 | 69.47 | 63.57 |
| 2029 | 18.98 | 8.22 | 59.69 | 58.11 | 68.58 | 64.99 |
| 2030 | 18.53 | 7.74 | 62.09 | 56.21 | 67.63 | 66.41 |
| 2031 | 17.99 | 7.24 | 64.49 | 54.14 | 66.64 | 67.84 |
| 2032 | 17.41 | 6.71 | 66.89 | 51.92 | 65.65 | 69.26 |
| 2033 | 16.86 | 6.11 | 69.29 | 49.63 | 64.67 | 70.69 |
| 2034 | 16.36 | 5.45 | 71.69 | 47.34 | 63.72 | 72.11 |
| 2035 | 15.9 | 4.74 | 74.09 | 45.11 | 62.77 | 73.54 |
| 变化率/% | −30.05 | −69.79 | 72.74 | −39.83 | −16.88 | 31.74 |

DALYs：伤残调整寿命年。

DALYs: disability-adjusted life years.

康宣教有限，社会经济压力较大，难以推广清洁能源的使用，致使非清洁燃料的使用频率较高[12]。1990—2021 年，全球、中国、南亚、东南亚、大洋洲、撒哈拉以南非洲地区归因于室内空气污染的白内障 DALYs 数有所上升，但年龄标准化 DALYs 率持续下降。DALYs 数的增加主要归因于人口增长和老龄化。随着全球人口结构的变化，老年人群占比增加，而衰老是白内障的首要危险因素，因而 DALYs 数增加。DALYs 率的下降可能是因为全球清洁能源获取的改善、改善室内空气

质量相关政策和干预措施的实施、白内障手术技术的进步和可及性的提高和科普工作的开展、公众健康意识的增强以及生活方式的改善。

地区分布差异显示，南亚地区归因于室内空气污染的白内障疾病负担最重，这与该地区广泛使用非清洁燃料、室内通风条件差、经济发展水平相对较低等因素密切相关[13]。性别差异分析结果显示，女性疾病负担普遍高于男性。这可能是由于在许多发展中国家，女性通常承担更多的家务劳动，特别是烹饪和取暖，因此暴露于室内空气污染的时间更长[14]；女性持续暴露于室内空气污染后，出现代谢紊乱的风险升高，同时会促进白内障的发生；此外，女性的平均寿命较长，白内障作为年龄相关性疾病，在女性中的患病率也相对较高。年龄差异分析结果显示，60 岁以上人群为主要疾病负担人群，这可能与白内障的发生、发展与衰老密切相关，以及全球人口老龄化加剧有关[15]。

室内空气污染导致白内障的潜在生物学机制复杂，涉及氧化应激级联反应、全身炎症传导、抗氧化物质耗竭等多重路径。首先，使用非清洁燃料烹饪、取暖、照明产生的悬浮颗粒、挥发性有机化合物、多芳烃、芳香胺、醛等燃烧产生的有害物质经呼吸吸收入血后，会诱发全身氧化应激的激活，使活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 在血液循环中累积[16]，经房水生成转移至晶状体微环境中，破坏晶状体的氧化还原稳态，导致晶状体上皮细胞功能障碍，诱发凋亡，导致白内障[17]。其次，晶状体微环境中累积的 ROS 还会直接攻击晶状体蛋白，破坏其分子伴侣功能，导致蛋白质错误折叠、异常交联聚集，引起白内障[18]。最后，有研究表明，长期暴露于室内空气污染也会造成人体抗氧化系统的耗竭，降低血清及房水中的抗氧化物质如谷胱甘肽 (glutathione, GSH) 和抗坏血酸的浓度，削弱晶状体清除自由基的能力，激活核因子 κB(nuclear factor kappa B, NF-κB) 信号通路，加剧自由基对晶状体的慢性炎症损伤，促进白内障的发生、发展[19]。

本研究根据不同地区的疾病负担历史变化趋势，使用 ARIMA 模型预测 2022—2035 年的白内障疾病负担趋势。结果显示，未来十年全球、中国、大洋洲、南亚年龄标准化 DALYs 率持续下降，但东南亚和撒哈拉以南非洲地区呈上升趋势，提示这些地区在室内空气污染防控方面面临更大挑战[20]。这可能由多重社会学与经济学因素共同驱动：第一，这两个地区正处于快速老龄化阶段，老年人口基数的激增可能抵消了环境改善带来的健康收益[21]；第二，尽管电力覆盖率有所提升，但在东南亚和非洲的广大农村地区，由于能源成本上涨和基础设施限制，固体燃料 (如生物质、煤炭) 的使用可能出现“复燃”或转型停滞，持续的室内污染暴露导致白内障发病风险居高不下[22]；第三，随着预期寿命延长，存量白内障患者激增，若当地眼科医疗服务系统供给不足，白内障手术率的增长速度无法追赶人口老龄化的速度，也会导致白内障 DALYs 率的上升[23]。这一预测结果对于全球公共卫生领域是一个强烈预警：对于东南亚和非洲地区，现有的自然干预模式已不足以维持归因于室内空气污染的白内障 DALYs 率下降趋势，亟需国际社会和公益组织在清洁能源推广和眼科医疗援助方面进行更强有力的针对性干预，如提供医疗设备、器械，支援眼科医务人员在当地进行培训、义诊等。

中国的显著改善可能与近年来政府积极落实的《大气污染防治行动计划》“煤改电” “煤改气”《农村人居环境整治三年行动方案》等政策大力推进清洁能源替代、加强环境治理、改善农村生活条件有关[24]。相关政策已被证实有效降低了环境暴露水平，Meng 等[25]的评估研究显示，这些清洁取暖政策使得中国北方农村地区室内 $PM_{2.5}$ 年均浓度显著下降。此外，大型流行病学证据证实了暴露减少带来的健康获益。Chan 等[26]基于中国慢性病前瞻性研究 (China Kadoorie Biobank, CKB) 对 48.6 万名成年人的分析发现，长期使用固体燃料烹饪会使白内障住院风险增加 32%，而改用清洁燃料可显著降低这一风险。这为我们的发现提供了直接的病因学证据。因此，我们推测中国人群归因于室内空气污染的白内障 DALYs 率可能与中国政府决策下的能源结构转型密切相关，这一观点还需要未来直接量化单一政策对白内障疾病负担的归因比例研究提供更可靠的证据支持。

综上所述，1990—2021 年全球归因于室内空气污染的白内障对于健康的影响仍然值得重视，全球归因于室内空气污染的白内障年龄标准化 DALYs 率持续下降，中国下降趋势显著，应继续推进相关政策。东南亚、撒哈拉以南非洲地区作

为全球室内空气污染防控的重点区域，需要政府加大清洁能源推广力度，投入财政补贴，同时寻求国际社会的技术支持和资金援助以有效推广清洁能源。在制定室内空气污染防控政策和健康宣教方案时，应充分考虑性别差异，重点保护女性群体，鼓励男性多承担家务劳动，并推广清洁烹饪技术。同时，应重点关注 60 岁以上习惯使用非清洁燃料进行烹饪、取暖、照明的老年人群，设立社区健康中心提供白内障早期筛查服务，并将“是否经常使用非清洁燃料”纳入临床病史询问，从而更具针对性地进行风险评估、疾病诊断，为高风险人群制订更加个性化的诊疗方案。

本研究存在以下局限性：首先，本研究基于 GBD 数据库进行建模估计，和真实疾病负担存在一定差异，由于本研究完成时 GBD 数据库的数据截至 2021 年，本研究设定的预测期 (2022—2035 年) 的前半段已成为历史，具有一定的滞后性。但考虑到数据库更新的周期性滞后是公共卫生研究的共性挑战，且本研究旨在揭示中长期的总体演变规律，因此基于 1990—2021 年数据进行趋势外推对于评估 2035 年可持续发展目标及指导未来的卫生资源配置仍具有重要的参考价值；其次，不同地区数据质量可能存在差异；此外，室内空气污染的定义和测量标准可能不完全一致；最后，本研究未考虑气候变化等其他环境因素对白内障的影响。

## 声明

在本作品的准备过程中，作者使用了 ChatGPT (OpenAI) 辅助进行英文语言润色、中文表述优化及部分代码撰写。所有研究设计、数据分析、结果解释和论文结论均由作者独立完成。使用该工具后，作者对相关内容进行了审查、核对和编辑，并对出版物的全部内容承担责任。

**利益冲突声明** 作者声明无利益冲突。

## 开放获取声明

本文适用于知识共享许可协议 (Creative Commons)，允许第三方用户按照署名 (BY)-非商业性使用 (NC)-禁止演绎 (ND)(CC BY-NC-ND) 的方式共享，即允许第三方对本刊发表的文章进行复制、发行、展览、表演、放映、广播或通过信息网络向公众传播，但在这些过程中必须保留作者署名、仅限于非商业性目的、不得进行演绎创作。

## 参考文献

1. Chen SP, Woreta F, Chang DF. Cataracts: a review[J]. JAMA, 2025, 333(23): 2093. DOI: 10.1001/jama.2025.1597.
2. Hashemi H, Pakzad R, Yekta A, et al. Global and regional prevalence of age-related cataract: a comprehensive systematic review and meta-analysis[J]. Eye, 2020, 34(8): 1357-1370. DOI: 10.1038/s41433-020-0806-3.
3. Liu YC, Wilkins M, Kim T, et al. Cataracts[J]. Lancet, 2017, 390(10094): 600-612. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)30544-5.
4. Bruce N, Perez-Padilla R, Albalak R. Household air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge[J]. Bull World Health Organ, 2000, 78(9): 1078-1092.
5. Balmes JR. Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health[J]. J Allergy Clin Immunol, 2019, 143(6): 1979-1987. DOI: 10.1016/j.jaci.2019.04.016.
6. Heilenbach N, Hu G, Lamrani R, et al. Environmental influences on ophthalmic conditions: a scoping review[J]. Clin Exp Ophthalmol, 2023, 51(6): 516-545. DOI: 10.1111/ceo.14262.
7. GBD 2021 Diseases and Injuries Collaborators. Global incidence, prevalence, years lived with disability (YLDs), disability-adjusted life-years (DALYs), and healthy life expectancy (HALE) for 371 diseases and injuries in 204 countries and territories and 811 subnational locations, 1990-2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. Lancet, 2024, 403(10440): 2133-2161. DOI: 10.1016/S0140-6736(24)00757-8.
8. Gao T, Wang XC, Chen R, et al. Disability adjusted life year (DALY): a useful tool for quantitative assessment of environmental pollution[J]. Sci Total Environ, 2015, 511: 268-287. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.11.048.
9. GBD 2021 HAP Collaborators. Global, regional, and national burden of household air pollution, 1990-2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. Lancet, 2025,405(10485):1167-1181.DOI:10.1016/S0140-6736(24)02840-X.
10. Kim HJ, Chen HS, Byrne J, et al. Twenty years since Joinpoint 1.0: Two major enhancements, their justification, and impact[J]. Stat Med, 2022, 41(16): 3102-3130. DOI: 10.1002/sim.9407.
11. Schaffer AL, Dobbins TA, Pearson SA. Interrupted time series analysis using autoregressive integrated moving average (ARIMA)

models: a guide for evaluating large-scale health interventions[J]. BMC Med Res Methodol, 2021, 21(1): 58. DOI: 10.1186/s12874-021-01235-8.

12. Li X, Guo Y, Liu T, et al. The association of cooking fuels with cataract among adults aged 50 years and older in low- and middle-income countries: Results from the WHO Study on global AGEing and adult health (SAGE)[J]. Sci Total Environ, 2021, 790: 148093. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148093.
13. Matawle JL, Pervez S, Shrivastava A, et al. $PM_{2.5}$ pollution from household solid fuel burning practices in central India: 1. Impact on indoor air quality and associated health risks[J]. Environ Geochem Health, 2017, 39(5): 1045-1058. DOI: 10.1007/s10653-016-9871-8.
14. Sehgal M, Rizwan SA, Krishnan A. Disease burden due to biomass cooking-fuel-related household air pollution among women in India[J]. Glob Health Action, 2014, 7: 25326. DOI: 10.3402/gha.v7.25326.
15. Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study; GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators. Global estimates on the number of people blind or visually impaired by cataract: a meta-analysis from 2000 to 2020[J]. Eye, 2024, 38(11): 2156-2172. DOI: 10.1038/s41433-024-02961-1.
16. Rylance J, Fullerton DG, Scriven J, et al. Household air pollution causes dose-dependent inflammation and altered phagocytosis in human macrophages[J]. Am J Respir Cell Mol Biol, 2015, 52(5): 584-593. DOI: 10.1165/rcmb.2014-0188OC.
17. Romieu I, Castro-Giner F, Kunzli N, et al. Air pollution, oxidative stress and dietary supplementation: a review[J]. Eur Respir J, 2008, 31(1): 179-197. DOI: 10.1183/09031936.00128106.
18. Pendergrass W, Penn P, Possin D, et al. Accumulation of DNA, nuclear and mitochondrial debris, and ROS at sites of age-related cortical cataract in mice[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2005, 46(12): 4661-4670. DOI: 10.1167/iovs.05-0808.
19. Calabró V, Garcés M, Cáceres L, et al. Urban air pollution induces alterations in redox metabolism and mitochondrial dysfunction in mice brain cortex[J]. Arch Biochem Biophys, 2021, 704: 108875. DOI: 10.1016/j.abb.2021.108875.
20. Bonjour S, Adair-Rohani H, Wolf J, et al. Solid fuel use for household cooking: country and regional estimates for 1980-2010[J]. Environ Health Perspect, 2013, 121(7): 784-790. DOI: 10.1289/ehp.1205987.
21. Wan Z, Bai J, Wang W, et al. Global, regional, and national burden of cataract among older adults from 1990 to 2021: a comprehensive analysis based on the global burden of disease study 2021[J]. Front Med, 2025, 12: 1679828. DOI: 10.3389/fmed.2025.1679828.
22. Rasel SM, Siddique AB, Nayon MFS, et al. Assessment of the association between health problems and cooking fuel type, and barriers towards clean cooking among rural household people in Bangladesh[J]. BMC Public Health, 2024, 24(1): 512. DOI: 10.1186/s12889-024-17971-7.
23. Jiang X, Xu B, Zhai J, et al. Global trends in cataract burden: a 30-year epidemiological analysis and prediction of 2050 from the Global Burden of Disease 2021 study[J]. Br J Ophthalmol, 2026, 110(2): 139-147. DOI: 10.1136/bjo-2025-327776.
24. Zhao N, Elshareef H, Li B, et al. The efforts of China to combat air pollution during the period of 2015-2018: a case study assessing the environmental, health and economic benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding “2 + 26” regions[J]. Sci Total Environ, 2022, 853: 158437. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158437.
25. Meng W, Zhong Q, Chen Y, et al. Energy and air pollution benefits of household fuel policies in northern China[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116(34): 16773-16780. DOI: 10.1073/pnas.1904182116.
26. Chan KH, Yan M, Bennett DA, et al. Long-term solid fuel use and risks of major eye diseases in China: a population-based cohort study of 486, 532 adults[J]. PLoS Med, 2021, 18(7): e1003716. DOI: 10.1371/journal.pmed.1003716.

**(责任编委：陈晓云；编辑：殷秋霞)**