

固体燃料使用与老年人牙齿缺失轨迹的关联： PM_{2.5}暴露与口腔健康行为的中介作用



丁丽芳¹, 杨旭², 曹世义³, 夏雨³, 蒋青青⁴

1. 华中科技大学医院口腔科 (武汉 430071)
2. 芜湖市中心血站 (安徽芜湖 241000)
3. 华中科技大学同济医学院公共卫生学院 (武汉 430030)
4. 华中科技大学同济医学院护理学院 (武汉 430030)

【摘要】目的 评估固体燃料使用与老年人牙齿缺失轨迹的关联, 并探讨PM_{2.5}暴露和口腔健康行为的中介作用。**方法** 数据来源于中国老年健康影响因素跟踪调查 (Chinese Longitudinal Healthy Longevity Survey, CLHLS) 2011—2012年、2014年和2017—2018年的三轮纵向数据。首先采用组基轨迹模型 (group-based trajectory model, GBTM) 划分不同的牙齿缺失轨迹组, 然后采用多因素 Logistic 回归模型分析固体燃料使用与牙齿缺失轨迹的关联, 最后运用中介分析量化 PM_{2.5}暴露及刷牙行为在该关联中的中介效应。**结果** 共纳入 4 335 名 ≥ 65 岁参与者, 识别出三条牙齿缺失轨迹, 分别为缓慢进展型 (40.6%)、快速进展型 (39.1%) 和无牙颌型 (20.3%)。与使用清洁燃料相比, 固体燃料使用与牙齿缺失不良轨迹 (快速进展型: OR = 1.17, 95% CI: 1.02 ~ 1.34; 无牙颌型: OR = 1.33, 95% CI: 1.11 ~ 1.59) 的风险增加相关。PM_{2.5}暴露解释了 51.2% 的关联效应, 规律刷牙则表现出保护作用, 负向中介比例为 -18.8%。**结论** 固体燃料使用增加了老年人牙齿缺失不良轨迹的风险, PM_{2.5}暴露是关键中介因素, 规律刷牙具有保护效应。推广清洁燃料和促进口腔卫生习惯对于保护老年人口腔健康具有重要意义。

【关键词】 老年人; 固体燃料使用; 牙齿缺失轨迹; PM_{2.5}暴露; 口腔健康行为; 中介作用

【中图分类号】 R 181.3; R 788 **【文献标识码】** A

Association between solid fuel use and tooth loss trajectories among the elderly: the mediating role of PM_{2.5} exposure and oral health behaviors

DING Lifang¹, YANG Xu², CAO Shiyi³, XIA Yu³, JIANG Qingqing⁴

1. Department of Stomatology, Hospital of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430071, China
2. Wuhu Blood Center, Wuhu 241000, Anhui Province, China
3. School of Public Health, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China
4. School of Nursing, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202607029

基金项目: 湖北省自然科学基金项目 (2026AFB142)

通信作者: 蒋青青, 博士, 博士后, Email: 15926273940@163.com

<https://slyyx.whuznhmedj.com/>

Corresponding author: JIANG Qingqing, Email: 15926273940@163.com

【Abstract】Objective To evaluate the association between solid fuel use and tooth loss trajectories in the elderly, and to explore the mediating role of $PM_{2.5}$ exposure and oral health behaviors. **Methods** Data were derived from three waves of longitudinal data of the Chinese Longitudinal Healthy Longevity Survey (CLHLS), including 2011—2012, 2014, and 2017—2018. First, the group-based trajectory model (GBTM) was adopted to identify distinct tooth loss trajectory groups. Next, multivariate Logistic regression model was used to analyze the association between solid fuel use and tooth loss trajectories. Finally, mediation analysis was performed to quantify the mediating effects of $PM_{2.5}$ exposure and tooth-brushing behavior in the above association. **Results** A total of 4 335 participants aged 65 and above were enrolled. Three tooth loss trajectories were identified: slow-progress (40.6%), rapid-progress (39.1%), and edentulism (20.3%). Compared with clean fuel use, solid fuel use was associated with an increased risk of adverse tooth loss trajectories (rapid-progress OR = 1.14, 95%CI: 1.07–1.33; edentulism: OR = 1.40, 95%CI: 1.15–1.71). $PM_{2.5}$ exposure explained 51.2% of the total association. Regular tooth brushing exerted a protective effect with a negative mediating proportion of –18.8%. **Conclusion** Solid fuel use increased the risk of adverse tooth loss trajectories in the elderly. $PM_{2.5}$ exposure serves as a critical mediating factor, while regular tooth brushing plays a protective role. The promotion of clean fuel utilization and healthy oral hygiene habits is essential for the protection of oral health of the elderly.

【Keywords】 The elderly; Solid fuel use; Tooth loss trajectories; $PM_{2.5}$ exposure; Oral health behaviors; Mediating role

牙齿缺失是老年人普遍存在的口腔问题，作为口腔健康状况的关键指标，对整体生活质量具有深远影响^[1-2]。随着人口快速老龄化，牙齿缺失患病率仍居高不下，尤其在老年人群中^[3]。我国第四次全国口腔健康流行病学调查显示，65~74岁人群中无牙颌者占5.8%，保留20颗以上牙齿者占73.6%^[4]。研究表明，牙齿缺失不仅是口腔健康的重要标志，还可预测更广泛的健康结局，包括营养不良、衰弱和认知功能障碍^[5-6]。此外，牙齿缺失还会影响言语、咀嚼功能和自尊心^[7]。因此，识别影响牙齿缺失的因素对于促进健康老龄化至关重要。

固体燃料使用，即主要依赖木材、作物残渣、煤炭或动物粪便进行烹饪和取暖，是室内空气污染的主要来源^[8]。家庭固体燃料燃烧会产生细颗粒物（particulate matter, PM）尤其是 $PM_{2.5}$ ，及二氧化氮（ NO_2 ）和一氧化碳（CO），从而增加高血压、关节炎、贫血和消化道癌症等疾病的发病风险^[9-12]。就口腔健康而言， $PM_{2.5}$ 介导的炎症和氧化应激可能直接加速牙周组织的破坏，这是牙齿缺失的主要驱动因素^[13]。具体而言，牙周病是一种与炎症相关的疾病，而固体燃料使用产生的 $PM_{2.5}$ 排放可能成为牙周病的潜在危险因

素，进而导致龋齿和牙齿缺失^[14-17]。尽管存在这一合理机制，但固体燃料使用与长期牙齿缺失轨迹（如随时间变化的缺失速率或模式）之间的关系仍缺乏系统研究。明确固体燃料暴露是否与特定的缺失轨迹（如无牙颌的加速或延迟发生）相关，可为理解其在口腔健康衰退中的作用提供重要见解。

除 $PM_{2.5}$ 介导的生理途径外，口腔健康行为也可能在固体燃料使用与牙齿缺失的关联中发挥中介作用。规律刷牙等口腔卫生习惯是公认的牙周病和牙齿缺失的保护因素^[18]。然而，依赖固体燃料的人群可能面临情境或行为上的障碍，难以维持良好的口腔卫生。例如，他们可能表现出较差的总体健康行为，这可能进一步加剧其在污染暴露下的口腔健康衰退^[19]。相反，持续的口腔卫生习惯可能缓冲 $PM_{2.5}$ 和固体燃料相关因素对牙周组织的有害影响。目前，口腔健康行为是否在固体燃料使用与牙齿缺失之间起中介或调节作用尚未明确。本研究旨在利用中国老年健康影响因素跟踪调查（Chinese Longitudinal Healthy Longevity Survey, CLHLS）纵向数据，探讨中国老年人固体燃料使用与牙齿缺失轨迹的关联，并重点分析 $PM_{2.5}$ 暴露和口腔健康行为的中介作用。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究数据来源于 CLHLS，这是一项具有全国代表性、持续进行的中国老年人纵向队列研究。有关 CLHLS 研究设计和人群的更多细节已在前期文献中报道^[20-22]。本研究已获得北京大学机构审查委员会的伦理审批（IRB00001052-13074）。在基线及随访调查时，所有参与者或其法定代理人均签署书面知情同意书。本队列研究利用了 CLHLS 三轮纵向数据，包括 2011—2012 年的基线调查，2014 年和 2017—2018 年的随访调查。排除标准：①年龄小于 65 岁；②基线燃料或牙齿数据缺失；③在第一次和第二次随访中牙齿数据均缺失；④随访时牙齿数量异常增加。

1.2 烹饪燃料使用情况

在 CLHLS 中，通过结构化问卷评估家庭燃料使用情况，询问参与者通常用于烹饪的燃料类型：“您家通常使用什么燃料做饭？”。如果参与者报告使用燃气、电力或太阳能烹饪，则被归类为清洁燃料使用者；反之，使用煤炭或焦炭、木柴或秸秆、木炭的则被归类为固体燃料使用者^[23-24]。

1.3 牙齿缺失轨迹评估

天然牙数量通过问题“您现在有多少颗天然牙？（不包括假牙）”进行评估。报告有 0 颗天然牙的参与者被归类为无牙颌，所有无牙颌参与者统一归入无牙颌组^[25]。天然牙数量在基线及每次随访时均通过自我报告获得。两次随访调查采用与基线相同的问卷和测量方法，以确保各轮数据收集的一致性。利用三轮数据确定参与者 2011—2018 年的牙齿缺失轨迹。

1.4 中介变量

1.4.1 $PM_{2.5}$ 暴露

每日地面 $PM_{2.5}$ 数据来自中国空气污染追踪（Tracking Air Pollution in China, TAP）数据库（<http://tapdata.org>），空间分辨率为 10 km^[26-27]。基于地面观测、卫星数据、空气质量模型、土地利用、人口和海拔高度，采用两阶段机器学习模型获得 $PM_{2.5}$ 估算值。将 2011 年的年均 $PM_{2.5}$ 浓度数据根据参与者的居住城市进行匹配，以描述本研究中个体的 $PM_{2.5}$ 暴露水平。 $PM_{2.5}$ 浓度分布见图 1。

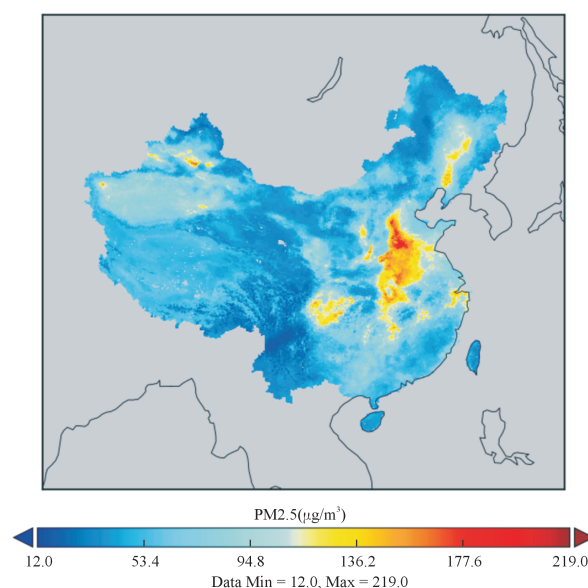


图 1 研究对象的 $PM_{2.5}$ 暴露分布

Figure 1. $PM_{2.5}$ exposure distribution of the study population

注：审图号为 GS（2024）0650 号，底图无修改。

1.4.2 口腔健康行为

将口腔健康行为定义为个体每天刷牙的频率。关于口腔卫生行为的选项分为“从不”、“偶尔”、“每天一次”、“每天两次”和“每天三次或以上”。为便于后续分析，将选项重新归类为“不刷牙”（包括“从不”和“偶尔”）和“规律刷牙”（包括“每天一次”、“每天两次”和“每天三次或以上”）^[28]。

1.5 协变量

在模型中调整基线时的社会人口学特征、健康行为和健康状况等协变量。社会人口学特征包括年龄（连续变量）、性别、居住地（城镇、农村）、受教育程度（文盲、识字）、婚姻状况（已婚/同居、丧偶/离异/未婚）和家庭年收入（< 8 000 元、8 000 ~ 30 000 元、> 30 000 元）。健康行为包括吸烟状况（是、否）、饮酒状况（是、否）和体育锻炼（是、否）。健康状况包括慢性病（自我报告的高血压和糖尿病）、体质指数（body mass index, BMI）和基线牙齿数量。

1.6 统计分析

使用 SPSS Statistics 25.0.0.1 和 R 4.2.3 软件进行统计分析， $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。针对 CLHLS 数据库中的缺失数据，采用模板法（使用 R “VIM” 包）^[29] 和基于预测均值匹配的多重插补法（使用 R “mice” 包）^[30] 进行插补。最终

插补后的数据集用于所有分析。连续变量以均数和标准差 ($\bar{x} \pm s$) 描述, 分类变量以频数和百分比 ($n, \%$) 描述。采用 Kruskal-Wallis 检验和卡方检验比较各牙齿缺失轨迹组间变量的差异。采用组基轨迹模型 (group-based trajectory model, GBTM) 根据 CLHLS 三轮测量数据识别潜在的牙齿缺失轨迹^[31-32]。慢性病数量的纵向数据采用贝叶斯信息准则 (bayesian information criterion, BIC) 最大值法拟合为删失正态模型下的多个潜在轨迹混合模型, 并使用历年年的多项式函数。

采用多因素 Logistic 回归检验固体燃料使用与牙齿缺失轨迹的关联, 将上述协变量采用逐步纳入策略构建三个模型: 模型 1 未校正; 模型 2 校正社会人口学特征与健康行为变量, 模型 3 进一步纳入健康状况相关变量, 结果以比值比 (odds ratio, OR) 及其 95% 置信区间 (confidence interval, CI) 表示。其中, 模型 2 校正年龄、性别、受教育程度、婚姻状况、吸烟状况、饮酒状况和体育锻炼; 模型 3 进一步校正家庭年收入、居住地、BMI、高血压、糖尿病和基线牙齿数量。使用 R “mediation” 包检验 PM_{2.5} 暴露和口腔健康行为在固体燃料使用与不良牙齿轨迹关联中的中介效应^[33], 并在调整所有协变量后计算各中介变量的间接效应 (indirect effect, IE)、直接效应 (direct effect, DE) 和总效应。鉴于两个中介变量代表不同的作用通路 (环境暴露通路和行为通路), 本研究分别进行单中介分析以检验各通路的独立中介效应。由于结局为二分类变量, 中介分析基于 Logistic 回归模型, 间接效应、直接效应和总效应均以 OR 值及其 95% CI 报告。

此外, 为探究固体燃料使用与牙齿缺失轨迹

关联的一致性, 按年龄、性别、BMI、吸烟状况、饮酒状况、体育锻炼、高血压和糖尿病进行分层分析。为验证关联的稳健性, 进行若干敏感性分析。首先, 为减少慢性呼吸系统疾病 (支气管炎、肺气肿、哮喘和肺炎) 对研究结果的潜在偏倚, 排除患有这些疾病的参与者并重新分析。其次, 为避免暴露状态不稳定的混杂, 排除从清洁燃料转为固体燃料的参与者后重新评估。最后, 将分析限制在协变量未经插补的参与者中。

2 结果

2.1 基线特征与牙齿缺失轨迹

共纳入 4 335 名参与者, 研究对象筛选流程见图 2。研究对象基线平均年龄为 (84.9 ± 10.8) 岁, 其中女性占 52.2%。根据模型拟合统计量 (表 1), 并确保每个识别类别至少包含样本的 5%, 共识别出三条不同的轨迹组 (轨迹曲线为模型拟合的群体平均水平, 个别时间点可能存在微小波动), 见图 3。轨迹根据参与者随时间推移的牙齿缺失趋势命名, 分别为缓慢进展型 (40.6%)、快速进展型 (39.1%) 和无牙颌型 (20.3%)。

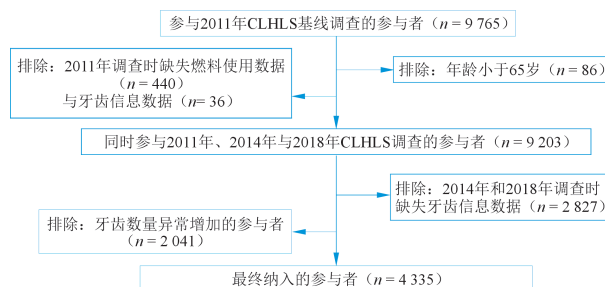


图2 研究对象筛选流程

Figure 2. Flowchart of participant selection

表 1 研究对象牙齿缺失轨迹模型拟合指标

Table 1. Model fit indices for tooth loss trajectories among participants

组别	AIC	BIC	CAIC	SSBIC	HQIC	熵值
1	75 518.94	75 551.94	75 555.94	75 539.23	75 529.56	NA
2	63 201.23	63 275.47	63 284.47	63 246.87	63 225.12	0.961
3	51 674.71	51 814.93	51 831.93	51 760.90	51 719.83	0.959
4	45 847.64	51 814.93	46 060.35	45 964.26	45 908.69	0.925
5	111 451.64	111 695.90	111 723.90	111 606.92	111 528.50	0.942

注: AIC, Akaike information criterion, 赤池信息准则; BIC, bayesian information criterion, 贝叶斯信息准则; CAIC, consistent Akaike information criterion, 一致赤池信息准则; SSBIC, sample-size adjusted bayesian information criterion, 样本校正贝叶斯信息准则; HQIC, Hannan-Quinn information criterion, 汉南-奎因信息准则; NA, not applicable, 不适用。

牙齿缺失轨迹分层的研究人群基线特征见表 2, 缓慢进展型、快速进展型和无牙颌型参与

者在年龄、性别、居住地、受教育程度、婚姻状况、家庭年收入、BMI、吸烟状况、饮酒状况、

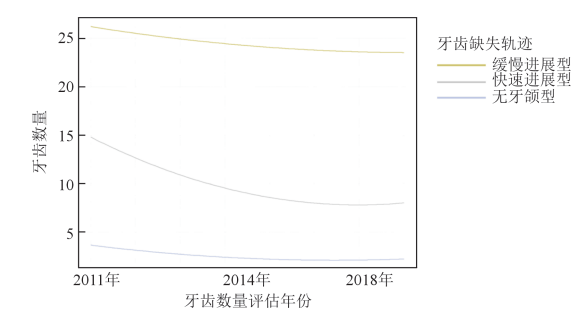


图3 中国老年人牙齿脱落轨迹
Figure 3. Tooth loss trajectories among older Chinese adults

体育锻炼、高血压、糖尿病、基线牙齿数量、烹饪燃料、刷牙频率方面的差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

2.2 固体燃料使用与牙齿缺失轨迹的关联

单因素 Logistic 回归分析结果表明，与使用清洁能源的参与者相比，使用固体燃料者进入快速进展型 (OR = 1.16, 95% CI: 1.02 ~ 1.33) 和无牙颌型 (OR = 1.33, 95% CI: 1.13 ~ 1.56) 的风险增加。在调整潜在混杂因素 (包括年龄、性别、居住地、受教育程度、婚姻状况、家庭年收入、吸

表2 按牙齿缺失轨迹分组的研究对象基线特征

Table 2. Baseline characteristics of participants stratified by tooth loss trajectories

项目	总人群 (<i>n</i> = 4 335)	缓慢进展型 (<i>n</i> = 1 759)	快速进展型 (<i>n</i> = 1 697)	无牙颌型 (<i>n</i> = 879)	<i>P</i> 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	84.9 $\pm$ 10.8	78.1 $\pm$ 9.0	83.3 $\pm$ 10.3	90.0 $\pm$ 9.7	< 0.001
性别 (<i>n</i> , %)					< 0.001
男性	2 073 (47.8)	702 (40.0)	830 (48.9)	541 (61.5)	
女性	2 262 (52.2)	1 057 (60.0)	867 (51.1)	338 (38.5)	
居住地 (<i>n</i> , %)					< 0.001
城镇	2 119 (48.9)	822 (46.7)	815 (48.0)	482 (54.8)	
农村	2 216 (51.1)	937 (53.3)	882 (52.0)	397 (45.2)	
受教育程度 (<i>n</i> , %)					< 0.001
文盲	2 413 (55.7)	1 192 (67.8)	902 (53.2)	319 (36.3)	
识字	1 922 (44.3)	567 (32.2)	795 (46.8)	560 (63.7)	
婚姻状况 (<i>n</i> , %)					< 0.001
已婚/同居	1 751 (40.4)	434 (24.7)	781 (46.0)	536 (61.0)	
丧偶/离异/未婚	2 584 (59.6)	1 325 (75.3)	916 (54.0)	343 (39.0)	
家庭年收入 (<i>n</i> , %)					0.033
< 8 000 元	1 328 (30.6)	564 (32.1)	501 (29.5)	263 (29.9)	
8 000 ~ 30 000 元	1 421 (32.8)	584 (33.2)	576 (34.0)	261 (29.7)	
> 30 000 元	1 586 (36.6)	611 (34.7)	620 (36.5)	355 (40.4)	
体质指数 ($\bar{x} \pm s$)	20.9 $\pm$ 6.2	19.9 $\pm$ 4.8	21.4 $\pm$ 4.8	22.1 $\pm$ 4.6	< 0.001
吸烟状况 (<i>n</i> , %)					< 0.001
是	824 (19.0)	283 (16.1)	324 (19.1)	217 (24.7)	
否	3 511 (81.0)	1 476 (83.9)	1 373 (80.9)	662 (75.3)	
饮酒状况 (<i>n</i> , %)					0.009
是	743 (17.2)	271 (15.4)	295 (17.4)	177 (20.1)	
否	3 592 (82.8)	1 488 (84.6)	1 402 (82.6)	702 (79.9)	
体育锻炼 (<i>n</i> , %)					< 0.001
是	1 522 (35.1)	515 (29.3)	638 (37.6)	369 (42.0)	
否	2 813 (64.9)	1 244 (70.7)	1 059 (62.4)	510 (58.0)	
高血压 (<i>n</i> , %)					< 0.001
有	1 340 (30.9)	486 (27.6)	551 (32.5)	303 (34.5)	
无	2 995 (69.1)	1 273 (72.4)	1 146 (67.5)	576 (65.5)	
糖尿病 (<i>n</i> , %)					< 0.001
有	200 (4.6)	51 (2.9)	86 (5.1)	63 (7.2)	
无	4 135 (95.4)	1 708 (97.1)	1 611 (94.9)	816 (92.8)	
基线牙齿数量 (<i>n</i> , %)					< 0.001
1 ~ 20 颗	3 280 (75.7)	1 759 (100.0)	1 396 (82.3)	125 (14.2)	
< 20 颗	1 055 (24.3)	0 (0.0)	301 (17.7)	754 (85.8)	
烹饪燃料 (<i>n</i> , %)					0.002
清洁能源	2 098 (48.4)	903 (51.3)	806 (47.5)	389 (44.3)	
固体燃料	2 237 (51.6)	856 (48.7)	891 (52.5)	490 (55.7)	
刷牙频率 (<i>n</i> , %)					< 0.001
规律刷牙	2 038 (47.0)	1 120 (63.7)	686 (40.4)	232 (26.4)	
不规律刷牙	2 297 (53.0)	639 (36.3)	1 011 (59.6)	647 (73.6)	

烟状况、饮酒状况、体育锻炼、BMI、高血压、糖尿病和基线牙齿数量）后，关联仍具有统计学显著性（快速进展型：OR = 1.17，95% CI：1.02 ~ 1.34；无牙颌型：OR = 1.33，95% CI：1.11 ~ 1.59）。见表3。

表3 固体燃料使用与牙齿缺失轨迹关联的多因素 Logistic 回归模型

分组	模型 1		模型 2		模型 3	
	OR (95%CI)	P 值	OR (95%CI)	P 值	OR (95%CI)	P 值
快速进展型 vs. 缓慢进展型						
清洁燃料	1.00		1.00		1.00	
固体燃料	1.16 (1.02 ~ 1.33)	0.021	1.16 (1.01 ~ 1.34)	0.034	1.17 (1.02 ~ 1.34)	0.027
无牙颌型 vs. 缓慢进展型						
清洁燃料	1.00		1.00		1.00	
固体燃料	1.33 (1.13 ~ 1.56)	< 0.001	1.31 (1.10 ~ 1.57)	0.003	1.33 (1.11 ~ 1.59)	0.002

注：OR，odds ratio，比值比；CI，confidence interval，置信区间。模型 1：未校正任何混杂因素；模型 2：校正年龄、性别、受教育程度、婚姻状况、吸烟状况、饮酒状况、体育锻炼；模型 3：在模型 2 基础上进一步校正家庭年收入、居住地、体质指数（BMI）、高血压、糖尿病、基线牙齿数量。

2.3 亚组分析与敏感性分析

按年龄、性别、BMI、饮酒状况、吸烟状况、体育锻炼、高血压和糖尿病分层的亚组分析结果见表4。性别和糖尿病显著修饰了固体燃料使用与牙齿缺失轨迹的关联。与女性相比，男性中固体燃料使用与快速进展型轨迹的关联显著（交互作用 $P = 0.021$ ）。同样，在糖尿病分层中观察到交互作用，在患有糖尿病的参与者中，固体燃料使用与牙齿缺失不良轨迹显著相关（快速进展型：交互作用 $P = 0.031$ ；无牙颌型：交互作用 $P = 0.036$ ）。

敏感性分析结果见表5、表6和表7。当排除报告有呼吸系统疾病（支气管炎、肺气肿、哮喘和肺炎）、从清洁燃料转为固体燃料的参与者，或仅纳入协变量未经插补的参与者时，固体燃料使用与牙齿缺失轨迹的关联仍然稳健。

2.4 中介分析

中介分析结果表明，固体燃料使用可能通过PM_{2.5}暴露的中介作用促进牙齿缺失不良轨迹的增加，IE 为 1.16（95% CI：1.04 ~ 1.30； $P < 0.05$ ），中介比例为 51.2%。同时，固体燃料使用对牙齿缺失不良轨迹的 DE 为 1.15（95% CI：1.02 ~ 1.30； $P < 0.05$ ）。关于规律刷牙的中介效应，该口腔卫生行为解释了-18.8%的关联，表明规律刷牙减轻了固体燃料使用对牙齿缺失不良轨迹的有害影响（IE = 0.84，95%CI：0.72 ~ 0.98；DE = 1.58，95%CI：1.30 ~ 1.92； $P < 0.05$ ）。见图4。

表4 固体燃料使用与牙齿脱落轨迹关联的分层分析

Table 4. Subgroup analysis for the association between solid fuel use and tooth loss trajectories

项目	快速进展型 vs. 缓慢进展型		无牙颌型 vs. 缓慢进展型	
	OR 值 (95%CI)	交互 P 值	OR 值 (95%CI)	交互 P 值
年龄		0.101		0.998
< 80 岁	1.44 (1.09 ~ 1.91)		1.51 (1.13 ~ 2.01)	
≥ 80 岁	1.10 (1.08 ~ 1.29)		1.38 (1.09 ~ 1.76)	
性别		0.021		0.386
男性	1.22 (1.00 ~ 1.49)		1.28 (1.02 ~ 1.60)	
女性	1.10 (0.92 ~ 1.32)		1.36 (1.06 ~ 1.74)	
体质指数		0.568		0.461
< 18.5	1.07 (0.85 ~ 1.35)		1.03 (0.74 ~ 1.43)	
18.5 ~ 23.9	1.07 (1.03 ~ 1.34)		1.38 (1.09 ~ 1.74)	
≥ 24	1.11 (0.79 ~ 1.56)		1.03 (0.71 ~ 1.49)	
吸烟状况		0.452		0.742
是	1.56 (1.13 ~ 2.14)		1.34 (1.14 ~ 1.90)	
否	1.10 (1.02 ~ 1.27)		1.36 (1.13 ~ 1.63)	
饮酒状况		0.861		0.788
是	1.19 (1.15 ~ 1.65)		1.26 (1.06 ~ 1.84)	
否	1.16 (1.01 ~ 1.35)		1.35 (1.13 ~ 1.62)	
体育锻炼		0.777		0.818
是	1.36 (1.07 ~ 1.73)		1.86 (1.40 ~ 2.47)	
否	1.15 (1.08 ~ 1.19)		1.56 (1.30 ~ 1.80)	
高血压		0.631		0.547
有	1.15 (1.09 ~ 1.47)		1.15 (1.06 ~ 1.54)	
无	1.14 (1.07 ~ 1.34)		1.37 (1.13 ~ 1.67)	
糖尿病		0.031		0.036
有	1.15 (1.00 ~ 1.32)		1.30 (1.10 ~ 1.53)	
无	0.90 (0.40 ~ 2.01)		0.90 (0.38 ~ 2.14)	

注：OR，odds ratio，比值比；CI，confidence interval，置信区间。模型校正了年龄、性别、居住地、受教育程度、婚姻状况、家庭年收入、吸烟状况、饮酒状况、体育锻炼、体质指数（BMI）、高血压、糖尿病以及基线牙齿数量。

表 5 排除呼吸系统疾病人群后固体燃料使用与牙齿缺失轨迹关联的敏感性分析结果 [OR (95%CI)]
Table 5. Sensitivity analysis results of the association between solid fuel use and tooth loss trajectory after excluding the population with respiratory system diseases [OR (95%CI)]

分组	模型 1	模型 2	模型 3
快速进展型 vs. 缓慢进展型			
清洁燃料	1.00	1.00	1.00
固体燃料	1.15 (1.09 ~ 1.33) *	1.15 (0.99 ~ 1.34)	1.14 (1.07 ~ 1.33) *
无牙颌型 vs. 缓慢进展型			
清洁燃料	1.00	1.00	1.00
固体燃料	1.40 (1.16 ~ 1.67) *	1.42 (1.17 ~ 1.73) *	1.40 (1.15 ~ 1.71) *

注：OR，odds ratio，比值比；CI，confidence interval，置信区间。模型 1：未校正任何混杂因素；模型 2：校正年龄、性别、受教育程度、婚姻状况、吸烟状况、饮酒状况、体育锻炼；模型 3：在模型 2 基础上进一步校正家庭年收入、居住地、体质指数（BMI）、高血压、糖尿病、基线牙齿数量。* $P < 0.05$ 。

表 6 排除燃料转换人群后固体燃料使用与牙齿缺失轨迹关联的敏感性分析结果[OR (95%CI)]
Table 6. Sensitivity analysis results of the association between solid fuel usage and tooth loss trajectory after excluding the population with fuel conversion [OR (95%CI)]

分组	模型 1	模型 2	模型 3
快速进展型 vs. 缓慢进展型			
清洁燃料	1.00	1.00	1.00
固体燃料	1.17 (1.02 ~ 1.34) *	1.18 (1.03 ~ 1.36) *	1.18 (1.02 ~ 1.35) *
无牙颌型 vs. 缓慢进展型			
清洁燃料	1.00	1.00	1.00
固体燃料	1.33 (1.13 ~ 1.56) *	1.38 (1.15 ~ 1.65) *	1.37 (1.14 ~ 1.64) *

注：OR，odds ratio，比值比；CI，confidence interval，置信区间。模型 1：未校正任何混杂因素；模型 2：校正年龄、性别、受教育程度、婚姻状况、吸烟状况、饮酒状况、体育锻炼；模型 3：在模型 2 基础上进一步校正家庭年收入、居住地、体质指数（BMI）、高血压、糖尿病、基线牙齿数量。* $P < 0.05$ 。

表 7 排除基线协变量经多重插补人群后固体燃料使用与牙齿缺失轨迹关联的敏感性分析结果[OR (95%CI)]
Table 7. Sensitivity analysis results of the association between solid fuel use and tooth loss trajectory after excluding the population whose baseline covariates underwent multiple imputation [OR (95%CI)]

分组	模型 1	模型 2	模型 3
快速进展型 vs. 缓慢进展型			
清洁燃料	1.00	1.00	1.00
固体燃料	1.17 (1.03 ~ 1.34) *	1.19 (1.04 ~ 1.37) *	1.18 (1.03 ~ 1.36) *
无牙颌型 vs. 缓慢进展型			
清洁燃料	1.00	1.00	1.00
固体燃料	1.33 (1.13 ~ 1.57) *	1.39 (1.16 ~ 1.67) *	1.38 (1.15 ~ 1.65) *

注：OR，odds ratio，比值比；CI，confidence interval，置信区间。模型 1：未校正任何混杂因素；模型 2：校正年龄、性别、受教育程度、婚姻状况、吸烟状况、饮酒状况、体育锻炼；模型 3：在模型 2 基础上进一步校正家庭年收入、居住地、体质指数（BMI）、高血压、糖尿病、基线牙齿数量。* $P < 0.05$ 。

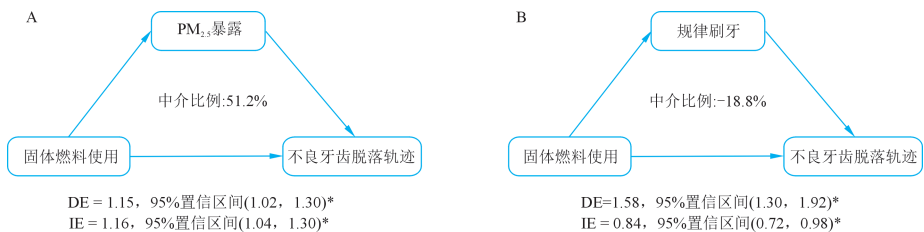


图 4 PM_{2.5}暴露和规律刷牙在固体燃料使用与老年人牙齿缺失不良轨迹关联中的中介分析
Figure 4. Mediation analysis of PM_{2.5} exposure and regular toothbrushing on the association between solid fuel use and adverse tooth loss trajectories among older adults

注：A. PM_{2.5}暴露；B. 规律刷牙。所有模型均校正了年龄、性别、居住地、受教育程度、婚姻状况、家庭年收入、吸烟状况、饮酒状况、体育锻炼、体质指数（BMI）、高血压、糖尿病和基线牙齿数量。IE，indirect effect，间接效应；DE，direct effect，直接效应。IE 和 DE 均以比值比（odds ratio，OR）呈现。* $P < 0.05$ 。

3 讨论

本研究探讨了中国老年人固体燃料使用与牙齿缺失轨迹的关联,并进一步探索了PM_{2.5}暴露和口腔健康行为的潜在中介作用。利用CLHLS纵向数据识别出三条牙齿缺失轨迹,分别为缓慢进展型(40.6%)、快速进展型(39.1%)和无牙颌型(20.3%)。结果表明,即使在调整多个协变量后,固体燃料使用仍与牙齿缺失不良轨迹风险显著相关。此外,中介分析显示,PM_{2.5}暴露介导了约51.2%的关联效应,而规律刷牙缓冲了有害效应,负向中介比例为-18.8%。与既往多项研究一致,固体燃料使用是口腔健康状况不佳的主要危险因素^[1, 17, 34]。Jin等发现固体燃料使用与口腔健康状况不佳相关(OR = 1.35, 95%CI: 1.29 ~ 1.42),且抑郁症状起中介作用^[1];Marruganti等将空气污染确定为牙周炎的风险指标^[17]。Zierold等的研究发现,燃煤电厂暴露增加了牙龈症状的发生风险(OR = 2.46, 95%CI: 1.46 ~ 4.15)^[34]。然而,这些研究多为横断面研究,未能追踪牙齿缺失随时间的动态变化过程。本研究将参与者分为三条不同的轨迹组,并量化了固体燃料使用对牙齿缺失不良轨迹的纵向风险。与清洁燃料使用者相比,固体燃料使用者进入快速进展型牙齿缺失组(OR = 1.14)和无牙颌组(OR = 1.40)的风险更高。这些发现不仅为口腔健康的动态评估提供了新的纵向证据,也量化了固体燃料使用的长期有害影响。

本研究初步证实了PM_{2.5}是固体燃料使用到牙齿缺失轨迹路径中的重要中介因素。这与生物学合理性一致,并扩展了先前的机制研究。细颗粒物可穿透肺泡黏膜和循环系统,促进促炎细胞因子和基质金属蛋白酶的释放,从而降解牙周韧带和牙槽骨^[16, 35]。Huang等的研究表明,PM_{2.5}暴露与牙周病风险增加相关,尤其在特定气象条件下^[16]。类似地,Zou等观察到PM_{2.5}诱导黏膜组织中炎性细胞因子的表达^[35],支持了本研究分析中提出的生物学途径。本研究首次提供了纵向实证支持以下假设,即固体燃料相关的PM_{2.5}暴露通过全身性炎症加剧口腔疾病进展,强调了将环境暴露评估纳入口腔健康干预的必要性。

本研究还发现,规律刷牙可减弱固体燃料使用对牙齿缺失轨迹的影响,提示良好的口腔卫生

可能部分抵消室内空气污染有害影响的有害影响。这一结果与行为健康理论一致,该理论认为促进健康的行为可以缓冲环境风险^[18-19, 36]。这也与Petersen和Ogawa的研究相符,该研究强调即使在高风险人群中,适当的口腔卫生习惯也可减轻牙周病负担^[18]。尽管此前尚无研究直接检验刷牙对固体燃料相关口腔损伤的缓冲作用,但本研究结果与既往证据一致,即行为因素可以改变环境暴露对健康结局的影响。Hashim等强调,个体良好的口腔卫生可能适度降低口腔癌风险^[36]。坚持规律刷牙习惯的个体可减少细菌菌斑积聚,从而降低基础炎症负荷,并增强对污染诱导的牙周损伤的抵抗力^[18, 37-39]。因此,旨在改善口腔卫生习惯的公共卫生措施可能对暴露于固体燃料的人群尤其有益。

本研究结果具有重要的公共卫生实践意义。首先,在环境政策层面,减少固体燃料使用、推广清洁燃料(天然气、电力)是降低老年人口腔健康风险的重要措施,这与我国“煤改气”“煤改电”的能源转型政策高度契合。其次,在个体行为层面,即使在固体燃料使用短期内无法完全替代的地区,推广规律刷牙等低成本口腔卫生干预措施仍可显著缓冲PM_{2.5}暴露的有害效应。最后,在健康公平层面,固体燃料使用者多为农村、低社会经济地位老年人,针对这一群体开展口腔健康促进项目,有助于缩小城乡口腔健康差距。未来公共卫生干预应整合“清洁能源推广+口腔健康教育”的双重策略,实现环境健康与口腔健康的协同改善。同时,本研究存在一定局限性。首先,暴露测量依赖于关于天然牙数量的自我报告数据,可能存在报告偏倚;其次,关于口腔健康评估,缺乏牙齿缺失的时间数据阻碍了对口腔健康状况与整体健康之间动态关系的深入探究;第三,未能获取社区或家庭室内PM_{2.5}实测数据,未来研究应利用个体暴露监测设备更精确地评估室内空气污染暴露水平;第四,本研究参与者为我国中老年人,可能限制研究结果向其他年龄组或具有不同医疗体系和环境暴露的国家推广。

综上,固体燃料使用可显著增加我国老年人牙齿缺失不良轨迹的风险。PM_{2.5}暴露通过全身性炎症和氧化应激在该关系中起关键中介作用,而规律刷牙通过缓冲固体燃料使用的有害影响表现

出保护效应。这提示减少固体燃料使用和PM_{2.5}暴露以及促进口腔卫生习惯对于改善老龄化人群口腔健康具有重要意义。

参考文献

- Jin H, Deng AP, Tian H, et al. The association between solid fuel use and oral health: the mediating effect of depressive symptom[J]. *Front Oral Health*, 2025, 6: 1583685. DOI: [10.3389/froh.2025.1583685](https://doi.org/10.3389/froh.2025.1583685).
- Baiju RM, Peter E, Varghese NO, et al. Oral health and quality of life: current concepts[J]. *J Clin Diagn Res*, 2017, 11(6): ZE21–ZE26. DOI: [10.7860/JCDR/2017/25866.10110](https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/25866.10110).
- 荣文笙, 胡德渝, 冯希平, 等. 我国城市地区成人牙本质敏感的流行病学调查[J]. *中华口腔医学杂志*, 2010, 45(3): 141–145. [Rong WS, Hu DY, Feng XP, et al. A national survey on dentin hypersensitivity in Chinese urban adults[J]. *Chinese Journal of Stomatology*, 2010, 45(3): 141–145.] DOI: [10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2010.03.004](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2010.03.004).
- Guo J, Ban JH, Li G, et al. Status of tooth loss and denture restoration in Chinese adult population: findings from the 4th national oral health survey[J]. *Chin J Dent Res*, 2018, 21(4): 249–257. DOI: [10.3290/j.cjdr.a41083](https://doi.org/10.3290/j.cjdr.a41083).
- Li L, Zhang Q, Yang D, et al. Tooth loss and the risk of cognitive decline and dementia: a meta-analysis of cohort studies[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1103052. DOI: [10.3389/fneur.2023.1103052](https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1103052).
- Komiyama T, Gallagher JE, Hattori Y. Relationship between tooth loss and progression of frailty: findings from the English longitudinal study of aging[J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2024, 127: 105572. DOI: [10.1016/j.archger.2024.105572](https://doi.org/10.1016/j.archger.2024.105572).
- Gerritsen AE, Allen PF, Witter DJ, et al. Tooth loss and oral health-related quality of life: a systematic review and meta-analysis[J]. *Health Qual Life Outcomes*, 2010, 8: 126. DOI: [10.1186/1477-7525-8-126](https://doi.org/10.1186/1477-7525-8-126).
- Smith KR, Pillariseti A. Household air pollution from solid cookfuels and its effects on health. In: Mock CN, Nugent R, Kobusingye O, Smith KR, editors. *Injury prevention and environmental health*. 3rd ed. Washington (DC): The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank; 2017 Oct 27. Chapter 7. DOI: [10.1596/978-1-4648-0522-6_ch7](https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0522-6_ch7).
- Deng Y, Gao Q, Yang T, et al. Indoor solid fuel use and incident arthritis among middle-aged and older adults in rural China: a nationwide population-based cohort study[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 772: 145395. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.145395](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145395).
- He Y, Liu X, Zheng Y, et al. Lower socioeconomic status strengthens the effect of cooking fuel use on anemia risk and anemia-related parameters: findings from the Henan Rural Cohort[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 831: 154958. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.154958](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154958).
- Sheikh M, Poustchi H, Pourshams A, et al. Household fuel use and the risk of gastrointestinal cancers: the Golestan Cohort Study[J]. *Environ Health Perspect*, 2020, 128(6): 67002. DOI: [10.1289/EHP5907](https://doi.org/10.1289/EHP5907).
- Islam R, Sheba NH, Siddique RF, et al. Association of household fuel use with hypertension and blood pressure among adult women in rural Bangladesh: a cross-sectional study[J]. *Am J Hum Biol*, 2023, 35(8): e23899. DOI: [10.1002/ajhb.23899](https://doi.org/10.1002/ajhb.23899).
- Wang YL, Gao W, Li Y, et al. Concentration-dependent effects of PM_{2.5} mass on expressions of adhesion molecules and inflammatory cytokines in nasal mucosa of rats with allergic rhinitis[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2017, 274(8): 3221–3229. DOI: [10.1007/s00405-017-4606-8](https://doi.org/10.1007/s00405-017-4606-8).
- Romandini P, Marruganti C, Romandini WG, et al. Are periodontitis and dental caries associated? A systematic review with meta-analyses[J]. *J Clin Periodontol*, 2024, 51(2): 145–157. DOI: [10.1111/jcpe.13910](https://doi.org/10.1111/jcpe.13910).
- Socransky SS, Haffajee AD, Goodson JM, et al. New concepts of destructive periodontal disease[J]. *J Clin Periodontol*, 1984, 11(1): 21–32. DOI: [10.1111/j.1600-051x.1984.tb01305.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-051x.1984.tb01305.x).
- Huang K, Feng LF, Liu ZY, et al. The modification of meteorological factors on the relationship between air pollution and periodontal diseases: an exploration based on different interaction strategies[J]. *Environ Geochem Health*, 2023, 45(11): 8187–8202. DOI: [10.1007/s10653-023-01705-6](https://doi.org/10.1007/s10653-023-01705-6).
- Marruganti C, Shin HS, Sim SJ, et al. Air pollution as a risk indicator for periodontitis[J]. *Biomedicine*, 2023, 11(2): 443. DOI: [10.3390/biomedicine11020443](https://doi.org/10.3390/biomedicine11020443).
- Petersen PE, Ogawa H. The global burden of periodontal disease: towards integration with chronic disease prevention and control[J]. *Periodontol*, 2000, 60(1): 15–39. DOI: [10.1111/j.1600-0757.2011.00425.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0757.2011.00425.x).
- McCarron A, Uny I, Caes L, et al. Solid fuel users' perceptions of household solid fuel use in low-and middle-income countries: a scoping review[J]. *Environ Int*, 2020, 143: 105991. DOI: [10.1016/j.envint.2020.105991](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105991).
- Lv X, Li W, Ma Y, et al. Cognitive decline and mortality among community-dwelling Chinese older people[J]. *BMC Med*, 2019, 17(1): 63. DOI: [10.1186/s12916-019-1295-8](https://doi.org/10.1186/s12916-019-1295-8).
- Zeng Y, Feng Q, Hesketh T, et al. Survival, disabilities in activities of daily living, and physical and cognitive functioning among the oldest-old in China: a cohort study[J]. *Lancet*, 2017, 389(10079): 1619–1629. DOI: [10.1016/S0140-6736\(17\)30548-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30548-2).
- Lv YB, Gao X, Yin ZX, et al. Revisiting the association of blood pressure with mortality in oldest old people in China: community based, longitudinal prospective study[J]. *BMJ*, 2018, 361: k2158. DOI: [10.1136/bmj.k2158](https://doi.org/10.1136/bmj.k2158).
- Deng Y, Zhao H, Liu Y, et al. Association of using biomass fuel for cooking with depression and anxiety symptoms in older Chinese adults[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 811: 152256. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.152256](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152256).
- Liu Y, Shao J, Liu Q, et al. Association between household fuel combustion and diabetes among middle-aged and older adults in China: a cohort study[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2023, 258: 114974. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2023.114974](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114974).
- Zhang X, Zeng R, Ye D, et al. Tooth loss trajectories and their association with all-cause mortality among older Chinese adults[J]. *Front Oral Health*, 2025, 6: 1535708. DOI: [10.3389/froh.2025.1535708](https://doi.org/10.3389/froh.2025.1535708).

- 26 Geng G, Xiao Q, Liu S, et al. Tracking air pollution in China: near real-time PM_{2.5} retrievals from multisource data fusion[J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 55(17): 12106–12115. DOI: [10.1021/acs.est.1c01863](https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01863).
- 27 Geng G, Zhang Q, Tong D, et al. Chemical composition of ambient PM_{2.5} over China and relationship to precursor emissions during 2005 – 2012[J]. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17(14): 9187–9203. DOI: [10.5194/acp-2016-1187](https://doi.org/10.5194/acp-2016-1187).
- 28 Zhang XM, Jiao J, Cao J, et al. The association between the number of teeth and frailty among older nursing home residents: a cross-sectional study of the CLHLS survey[J]. *BMC Geriatr*, 2022, 22(1): 1007. DOI: [10.1186/s12877-022-03688-y](https://doi.org/10.1186/s12877-022-03688-y).
- 29 Templ M, Alfons A, Filzmoser P. Exploring incomplete data using visualization techniques[J]. *Adv Data Anal Classi*, 2012, 6(1): 29–47. DOI: [10.1007/s11634-011-0102-y](https://doi.org/10.1007/s11634-011-0102-y).
- 30 Zhang Z. Multiple imputation with multivariate imputation by chained equation (MICE) package[J]. *Ann Transl Med*, 2016, 4(2): 30. DOI: [10.3978/j.issn.2305-5839.2015.12.63](https://doi.org/10.3978/j.issn.2305-5839.2015.12.63).
- 31 Nagin DS. Group-based trajectory modeling: an overview[J]. *Ann Nutr Metab*, 2014, 65(2–3): 205–210. DOI: [10.1159/000360229](https://doi.org/10.1159/000360229).
- 32 Nagin DS, Odgers CL. Group-based trajectory modeling in clinical research[J]. *Annu Rev Clin Psychol*, 2010, 6: 109–138. DOI: [10.1146/annurev.clinpsy.121208.131413](https://doi.org/10.1146/annurev.clinpsy.121208.131413).
- 33 Geng T, Zhu K, Lu Q, et al. Healthy lifestyle behaviors, mediating biomarkers, and risk of microvascular complications among individuals with type 2 diabetes: a cohort study[J]. *PLoS Med*, 2023, 20(1): e1004135. DOI: [10.1371/journal.pmed.1004135](https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1004135).
- 34 Zierold KM, Hagemeyer AN, Sears CG. Health symptoms among adults living near a coal-burning power plant[J]. *Arch Environ Occup Health*, 2019, 75(5): 289–296. DOI: [10.1080/19338244.2019.1633992](https://doi.org/10.1080/19338244.2019.1633992).
- 35 Zou W, Wang X, Hong W, et al. PM_{2.5} induces the expression of inflammatory cytokines via the Wnt5a/Ror2 pathway in human bronchial epithelial cells[J]. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*, 2020, 15: 2653–2662. DOI: [10.2147/COPD.S270762](https://doi.org/10.2147/COPD.S270762).
- 36 Hashim D, Sartori S, Brennan P, et al. The role of oral hygiene in head and neck cancer: results from International Head and Neck Cancer Epidemiology (INHANCE) consortium[J]. *Ann Oncol*, 2016, 27(8): 1619–1625. DOI: [10.1093/annonc/mdw224](https://doi.org/10.1093/annonc/mdw224).
- 37 Reyes Garita P, Tran VT, Chatzopoulou E, et al. Oral hygiene behaviors and periodontitis among patients with chronic diseases and its impact on tooth loss and oral health-related quality of life: a cross-sectional study of data from the ComPaRe e-cohort[J]. *Clin Oral Investig*, 2024, 28(10): 518. DOI: [10.1007/s00784-024-05903-z](https://doi.org/10.1007/s00784-024-05903-z).
- 38 Yang BI, Park JA, Lee JY, et al. Effects of lingual and palatal site toothbrushing on periodontal disease in the elderly: a cross-sectional study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(10): 5067. DOI: [10.3390/ijerph18105067](https://doi.org/10.3390/ijerph18105067).
- 39 Li A, Chen Y, Du M, et al. Healthy lifestyles ameliorate an increased risk of periodontitis associated with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Chemosphere*, 2024, 364: 143086. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2024.143086](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143086).

收稿日期: 2026 年 07 月 08 日 修回日期: 2026 年 08 月 29 日

本文编辑: 张 苗 黄 笛

引用本文: 丁丽芳, 杨旭, 曹世义, 等. 固体燃料使用与老年人牙齿缺失轨迹的关联: PM_{2.5}暴露与口腔健康行为的中介作用[J]. 数理医药学杂志, 2026, 39(10): 715–724. DOI: [10.12173/j.issn.1004-4337.202607029](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202607029).

Ding LF, Yang X, Cao SY, et al. Association between solid fuel use and tooth loss trajectories among the elderly: the mediating role of PM_{2.5} exposure and oral health behaviors[J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2026, 39(10): 715–724. DOI: [10.12173/j.issn.1004-4337.202607029](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202607029).