

社会经济、空气污染对预期寿命的非线性影响

曾怡纯¹, 余佳¹, 张瑞芳¹, 高文瑛^{2*}

¹重庆工商大学公共管理学院人文地理与城乡规划系, 重庆

²重庆工商大学公共管理学院城乡规划系, 重庆

收稿日期: 2025年4月19日; 录用日期: 2025年5月11日; 发布日期: 2025年5月22日

摘要

本研究基于2000~2020年亚洲48个国家和地区的数据, 采用广义加性模型(GAM), 探讨了人均国民总收入(GNI_{pc})、城市人口率(UPR)和细颗粒物(PM_{2.5})浓度与预期寿命(LE)的非线性关系。研究发现: (1) 在时间尺度上, GNI_{pc}与LE呈现稳定的非线性关系, 而UPR和PM_{2.5}与LE的关系未表现出显著的线性或非线性特征; (2) 在空间尺度上, 亚洲不同地区的GNI_{pc}、UPR和PM_{2.5}对LE的影响存在显著差异。总而言之, 社会经济因素和空气污染因素对预期寿命的非线性影响不容忽视。

关键词

预期寿命, 广义加性模型, 非线性关系, 社会经济因素, 亚洲地区

Nonlinear Effects of Socio-Economic and Air Pollution on Life Expectancy

Yichun Zeng¹, Jia Yu¹, Ruifang Zhang¹, Wenying Gao^{2*}

¹Department of Human Geography and Urban-Rural Planning, Public Management School, Chongqing Technology and Business University, Chongqing

²Department of Urban and Rural Planning, School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing

Received: Apr. 19th, 2025; accepted: May 11th, 2025; published: May 22nd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 曾怡纯, 余佳, 张瑞芳, 高文瑛. 社会经济、空气污染对预期寿命的非线性影响[J]. 统计学与应用, 2025, 14(5): 83-96. DOI: 10.12677/sa.2025.145128

Abstract

This study, based on data from 48 countries and regions in Asia from 2000 to 2020, employs a Generalized Additive Model (GAM) to explore the nonlinear relationships between per capita gross national income (GNI_{pc}), urban population ratio (UPR), and fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration with life expectancy (LE). The research finds: (1) On a temporal scale, GNI_{pc} shows a stable nonlinear relationship with LE, whereas UPR and $PM_{2.5}$ do not exhibit significant linear or nonlinear characteristics with LE; (2) On a spatial scale, the impacts of GNI_{pc} , UPR, and $PM_{2.5}$ on LE vary significantly across different regions of Asia. In summary, the nonlinear impacts of socioeconomic factors and air pollution on life expectancy cannot be overlooked.

Keywords

Life Expectancy, Generalized Additive Models, Nonlinear Relationships, Socio-Economic Factors, Asian Region

Copyright © 2025 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

预期寿命(Life Expectancy, LE)作为衡量人口健康状况的核心指标,在社会经济发展评估、公共卫生政策制定以及健康预期监测中发挥着关键作用(World Health Organization, 2001) [1]。联合国开发计划署将预期寿命与教育水平、人均国民收入共同纳入人类发展指数体系,作为评估各国社会发展水平的重要依据(UNDP, 2020) [2]。尽管亚洲地区整体预期寿命水平显著提升,但区域间仍存在明显差异,这一现象亟待深入研究。

现有文献表明,预期寿命受到多重因素的影响,其中社会经济因素和空气污染是最受关注的两个维度。在社会经济因素方面,社会经济地位低下与预期寿命显著缩短有关(The Lancet, 2017) [3],社会经济地位因素(如收入、教育、就业)对省级预期寿命差距的解释度远高于危险因素和卫生服务因素(ZHANG Leyi, 2024) [4]。在空气污染方面,大量研究证实了 $PM_{2.5}$ 等污染物与预期寿命的负向关联。降低 $PM_{2.5}$ 暴露有助于延长预期寿命(Pope, 2009) [5]; 而 de Keijzer 等人(2017) [6]、Dziubanek 等人(2017) [7]的研究则揭示了空气污染会导致预期寿命损失。值得注意的是,Cheng 等人(2021) [8]基于香港微观数据的研究发现, $PM_{2.5}$ 与预期寿命损失之间存在非线性关系。

然而,现有研究仍存在以下局限:首先,多数研究聚焦于线性关系的探讨,缺乏对社会经济因素和空气污染与预期寿命之间非线性关系的系统分析;其次,现有研究较少考虑时空异质性对研究结果的影响;最后,针对亚洲地区的系统性研究相对不足。为弥补这些研究空白,本研究采用广义加性模型(Generalized Additive Models, GAM)这一灵活的非参数方法(Samet *et al.*, 2000) [9]。GAM 通过一系列复杂度可调的非参数曲线,能够实现从线性到无约束估计的灵活建模(Moolgavkar, 2000; Samoli *et al.*, 2001) [10],为深入分析预期寿命的影响因素提供了可靠的方法论支持。

本研究旨在通过构建 GAM 模型,系统考察亚洲地区社会经济因素和空气污染与预期寿命之间的非线性关系,重点关注时空异质性对研究结果的影响。研究结果将为制定区域差异化公共卫生政策、促进健康公平提供科学依据。

2. 数据和方法

2.1. 数据

2.1.1. 预期寿命

预期寿命(Life Expectancy, LE)是基于特定年份各年龄组死亡率计算得出的综合性人口健康指标,反映了一个国家或地区人口的总体死亡模式。作为衡量公共卫生水平的核心指标,预期寿命被联合国开发计划署(2010)纳入人类发展指数(HDI)评价体系。世界卫生组织(2013)强调,预期寿命是评估特定人群公共卫生状况、经济发展水平及生活质量的关键参数。基于其科学性和代表性,本研究将预期寿命作为衡量国家层面公共卫生状况的核心因变量(见表 1)。

Table 1. Indicators selected in this study

表 1. 本研究选取的指标

指标	英文全称	缩写	单位
出生时的预期寿命	Life expectancy at birth	LE	年
人均国民收入	Gross National Income per capita	GNI _{pc}	美元
城市人口比例	Urban population rate	UPR	%
细颗粒物	Fine particulate matter	PM _{2.5}	微克/立方米

2.1.2. 人均国民总收入

人均国民总收入(Gross National Income per capita, GNI_{pc})是指一个国家在一定时期内(通常为一年)按人口平均计算的国民收入总量,是衡量国家经济发展水平和居民生活质量的综合性指标。研究表明,GNI_{pc}与人口健康状况呈现显著的正相关关系(Preston, 1975)。较高的人均国民收入水平通常意味着更好的医疗资源配置、更完善的公共卫生服务以及更高的生活标准,这些因素共同促进了人口健康水平的提升。因此,本研究选取以现价美元计算的人均国民总收入作为衡量经济发展水平的核心解释变量之一(见表 1)。

2.1.3. 城镇化率

城镇化率(Urban Population Rate, UPR)是衡量城市化水平的核心指标,其定义为城镇人口占总人口的比例。大量研究表明,城市化进程与国家及跨国层面的预期寿命呈现显著的正相关关系。城市化不仅促进了医疗资源的集中配置和公共卫生服务的优化,还推动了生活方式的现代化,从而对人口健康产生积极影响。基于此,本研究将城市人口率作为衡量社会发展水平的关键指标(见表 1)。

2.1.4. 细颗粒物(PM_{2.5})

细颗粒物(Fine particulate matter, PM_{2.5})是指空气动力学直径小于或等于 2.5 微米的大气颗粒物,是大气污染的主要成分之一。与较大粒径的颗粒物相比,PM_{2.5}具有更大的比表面积、更强的吸附能力以及更长的滞留时间,能够携带重金属、微生物等有害物质,对人体健康构成严重威胁。世界卫生组织国际癌症研究机构(IARC)于 2013 年 10 月 17 日发布的报告首次将大气污染明确列为人类致癌物,并强调其作为普遍性环境致癌物的危害性。鉴于 PM_{2.5}对公共健康的显著影响,本研究选取年平均 PM_{2.5}暴露浓度(微克/立方米)作为衡量国家层面空气污染水平的核心指标(见表 1)。

2.2. 方法

本研究采用广义加性模型(Generalized Additive Model, GAM)探讨预期寿命与社会经济因素及空气污染之间的复杂关系。广义加性模型作为一种非参数统计模型,具有高度的灵活性(Wood, 2006),能够有效

降低传统线性假设带来的模型风险,同时捕捉时空过程中的线性与非线性特征,从而更全面地揭示驱动机制。基于 GAM 模型的优势,本研究能够更好地表征预期寿命(Life Expectancy, LE)与其影响因素之间的非线性关系,其数学表达式如下(Guisan *et al.*, 2002) [11]:

$$g(E(y)) = \beta_0 + \sum_{i=1}^m f(x_i)$$

其中, β_0 是模型的常数项,是描述第 i 个解释变量 x_i 与 $g(E(y))$ 之间关系的平滑样条函数, m 为解释变量的数量。平滑函数 $f(x_i)$ 可以采用参数化、非参数化或半参数化的形式,并通过非参数方法进行估计。

在构建 GAM 模型时,首先选择合适的基函数。本研究选择了以预期寿命(LE)为响应变量,社会经济因素(GNI_{pc}、UPR)和空气污染指标(PM_{2.5})为解释变量,选用薄板样条作为平滑函数基。其次,考虑到响应变量的性质和分布特征,应选择了合适的链接函数(link function)以确保模型的合理性和有效性。因其响应变量预期寿命(LE)为连续型且近似正态分布,本研究选择高斯分布作为误差分布,并采用恒等链接函数(Identity Link)并通过 Q-Q 图与残差诊断验证分布假设。

平滑参数的选择对于 GAM 模型的拟合效果起到重要的作用。GAM 模型中的平滑参数通过广义交叉验证准则(Generalized Cross-Validation, GCV)来自动优化选择(Wood, 2017) [12]。GCV 方法通过平衡模型的拟合优度和复杂度,寻找最优的平滑参数,以避免过拟合或欠拟合。具体而言,GCV 准则最小化以下函数:

$$GCV(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{1 - \frac{df}{n}} \right)^2$$

其中, λ 表示平滑参数, y_i 为观测值, \hat{y}_i 为模型预测值, df 为模型的自由度, n 为样本量。通过最小化 GCV 函数,可以得到最优的平滑参数,从而确保模型在捕捉数据中的非线性关系的同时,保持良好的预测性能。

为验证 GAM 模型在本研究中的适用性与准确性,我们对比了线性回归模型(Linear Model, LM)与 GAM 模型的拟合精度。在模型构建前,对所有自变量进行了相关性分析与共线性诊断。结果显示,各变量间的相关系数均低于 0.5,方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)均小于 10,表明变量间不存在显著的多重共线性问题。

本研究的所有 GAM 分析均基于 R 语言的 `mgecv` 包(版本 3.3.3)实现(Wood & Wood, 2015) [13]。模型优度通过调整后的决定系数(Adjusted R²)、赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)以及等效自由度(Effective Degrees of Freedom, edf)进行评估。此外,利用 ArcGIS (版本 10.2)绘制了相关空间分布图(见图 1),以直观展示研究结果的空间格局。

3. 时空分布特征

通过对 2000~2020 年亚洲地区数据的系统收集与整理,本研究揭示了预期寿命(Life Expectancy, LE)、城镇化率(Urban Population Rate, UPR)、细颗粒物浓度(PM_{2.5})以及人均国民总收入(Gross National Income per capita, GNI_{pc})的时空演变规律及其相互关系(见图 1、表 2)。

3.1. 预期寿命的时空分布特征

在预期寿命方面,2000 年至 2020 年期间,亚洲各国的预期寿命呈现显著的空间分异格局(见图 1)。高预期寿命国家主要集中在东南亚(如新加坡、以色列)、东亚(如韩国、日本)以及西亚(如黎巴嫩、塞浦路

斯)等经济发达地区。相比之下,预期寿命较低的国家主要分布在东南亚(如东帝汶、柬埔寨、老挝)、南亚(如尼泊尔、不丹、印度)以及西亚(如阿富汗)等经济发展相对滞后的区域。从时间维度来看,亚洲地区的预期寿命整体呈现稳步上升趋势,区域平均水平从2000年的68.7岁增长至2020年的73.73岁,增幅达5.03岁。这一趋势反映了亚洲地区整体公共卫生水平的显著提升。

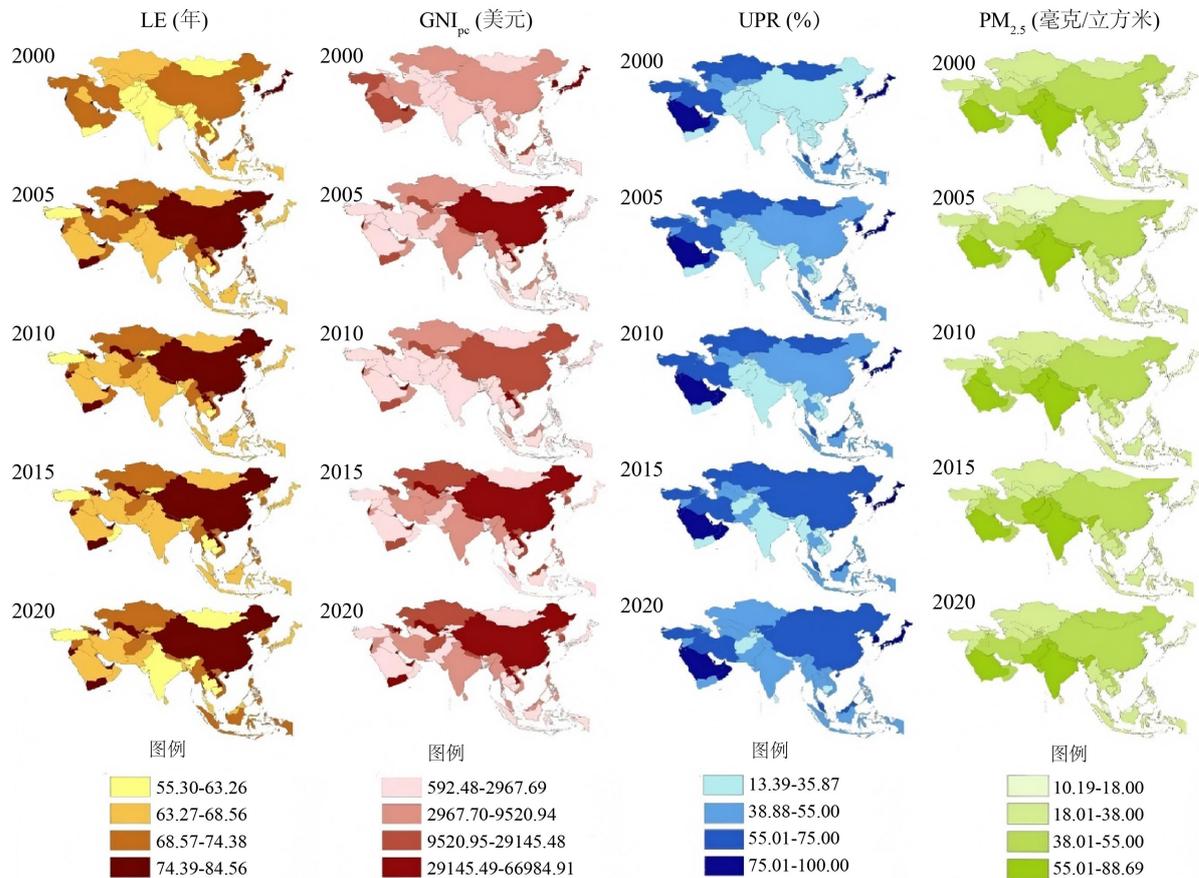


Figure 1. Spatial distribution of LE, GNI_{pc}, UPR and PM_{2.5} in Asia in 2000~2020 with 5-year intervals

图 1. 2000~2020 年亚洲 LE、GNI_{pc}、UPR、PM_{2.5} 空间分布以 5 年为间隔

Table 2. Results of linear model and generalized additive model

表 2. 线性模型和广义加性模型的结果

模型	变量	估计量	标准差	t 值	p 值	调整后的 R ²	AIC
LM	(拦截)	66.737	0.517	129.171	<2e-16***	0.63	2995.173
	GNI	0.000121	1.26e-05	9.539	4.38e-20***		
	UPR	0.1117	0.0086	13.0577	3.31e-34***		
	PM _{2.5}	-0.0486	0.0075	-6.4639	2.22e-10***		
模型	变量	edf	Ref.df	F	p 值	调整后的 R ²	AIC
GAM	GNI	8.570	8.942	37.862	<2e-16***	0.762	2760.469
	UPR	1.957	1.998	13.483	3.54e-06***		
	PM _{2.5}	7.083	8.153	5.414	1.51e-06***		

注: *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001。

3.2. 社会经济水平的时空分布特征

社会经济水平的时空分布通过人均国民总收入(GNI_{pc})和城镇化率(UPR)两个指标得以体现(见图 1)。研究结果显示,人均国民总收入的高值区主要集中在东亚(如韩国、日本)、西亚(如阿拉伯联合酋长国、卡塔尔、科威特)以及东南亚(如文莱达鲁萨兰国、新加坡)等经济发达国家和地区;而低值区则主要分布在东南亚(如东帝汶、柬埔寨、老挝、越南、缅甸)、南亚(如尼泊尔、印度)、东亚(如朝鲜、蒙古)、中亚(如吉尔吉斯共和国、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦)以及西亚(如阿富汗)等经济发展相对滞后的区域。

城镇化率的空间分布同样呈现显著差异,高值区主要集中于西亚(如卡塔尔、科威特、约旦)、东南亚(如新加坡)以及东亚(如日本)等城市化进程较快的国家和地区;而低值区则主要分布在东南亚(如东帝汶、柬埔寨、老挝、越南)、南亚(如尼泊尔、不丹、斯里兰卡、孟加拉)以及西亚(如阿富汗)等城市化水平较低的区域。从时间趋势来看,2000~2020年间亚洲地区的城镇化率呈现稳步上升态势,区域平均水平从2000年的52.43%增长至2020年的59.27%。人均国民总收入则表现出波动性上升趋势,反映了亚洲地区经济发展的不均衡性。

3.3. 空气污染指标 PM_{2.5} 时空分布特征

在空气污染方面,细颗粒物(PM_{2.5})浓度的空间分布呈现显著的区域差异(见图 1)。PM_{2.5}浓度较低的国家主要分布在东南亚(如东帝汶、马来西亚、文莱达鲁萨兰国、新加坡)、东亚(如日本)、南亚(如马尔代夫)以及西亚(如巴勒斯坦)等环境治理较好的地区;而PM_{2.5}浓度较高的国家则主要集中在西亚(如巴林、卡塔尔、科威特)以及南亚(如尼泊尔、巴基斯坦、印度、孟加拉)等工业化程度较高或环境治理相对滞后的区域。从时间演变来看,2000~2020年间亚洲地区的PM_{2.5}浓度呈现“先上升后下降”的倒U型趋势。这一变化可能与区域工业化进程、能源结构调整以及环境治理政策的实施密切相关,反映了亚洲地区在经济发展与环境保护之间的动态平衡。

4. 非线性建模结果

4.1. 整体趋势

结果表明(见表 2),PM_{2.5}与预期寿命(LE)呈显著负相关($p < 0.001$),而人均国民总收入(GNI_{pc})和城市人口比例(UPR)与LE呈显著正相关($p < 0.001$)。线性模型(LM)结果显示,调整后的R²值为0.630,表明该模型可以解释LE变异的63%。相比之下,广义加性模型(GAM)分析结果显示,GNI_{pc}、UPR和PM_{2.5}的等效自由度(edf)分别为8.570、1.957和7.083,表明这些变量与LE之间存在显著的非线性关系($p < 0.001$)。GAM模型的R²值(0.762)显著高于LM模型(0.630),且AIC值(2760.469)低于LM模型(2995.173),表明GAM模型在LE模拟方面具有更好的拟合优度。

GAM模型的优势在于其能够有效捕捉GNI_{pc}、UPR、PM_{2.5}与LE之间的非线性关系。基于GAM模型的拟合结果,本研究绘制了社会经济因素和空气污染与LE的总体响应关系曲线(见图 2)。具体而言,GNI_{pc}与LE的关系呈现明显的非线性特征:当GNI_{pc}从初始值增长至7000美元时,LE呈现快速上升趋势;在7000至37500美元区间,LE增速趋缓;当GNI_{pc}超过37500美元后,LE呈现波动下降趋势。UPR与LE的关系则表现为先下降后上升的U型曲线,其最低点出现在UPR为50%左右。就PM_{2.5}而言,LE随PM_{2.5}浓度的变化呈现先快速上升,随后波动下降,再次逐渐上升的整体趋势。

4.2. 时间差异

GAM模型的拟合结果表明,2000~2020年间模型的AIC值从257.244显著下降至235.909,这一变化趋势表明社会经济因素和空气污染对预期寿命(LE)的非线性影响呈现逐渐增强的特征(见表 3)。

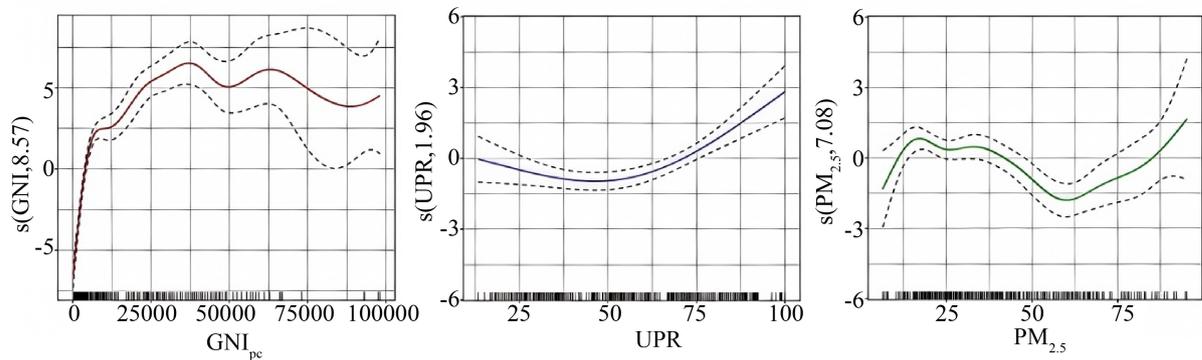


Figure 2. Response curves of GNI_{pc} , UPR and $PM_{2.5}$ effects on an Asian scale

图 2. 亚洲尺度上 GNI_{pc} , UPR 和 $PM_{2.5}$ 效应的响应曲线

Table 3. Time variation diagram of modeling parameters based on generalized additive modeling

表 3. 基于广义加性建模的建模参数时间变化图

年份	变量	edf	F	p 值	调整后的 R^2	AIC
2000	GNI_{pc}	5.666	3.3706	0.00701**	0.707	257.244
	UPR	1	2.7463	0.10572		
	$PM_{2.5}$	1	1.7876	0.18916		
2005	GNI_{pc}	3.325	3.933	0.00818**	0.678	252.089
	UPR	1	3.9004	0.05504		
	$PM_{2.5}$	1	2.1687	0.14848		
2010	GNI_{pc}	3.561	3.848	0.00860**	0.708	243.349
	UPR	1.442	2.2437	0.14467		
	$PM_{2.5}$	1	2.510	0.12099		
2015	GNI_{pc}	3.714	4.877	0.00194**	0.732	238.969
	UPR	1.576	2.1030	0.16631		
	$PM_{2.5}$	1	2.4262	0.1272		
2020	GNI_{pc}	3.225	4.9744	0.00269**	0.723	235.909
	UPR	1	3.8842	0.07345		
	$PM_{2.5}$	2.502	1.0801	0.37826		

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。

就城镇化率(UPR)与预期寿命的关系而言, 2000年(edf = 1, $p = 0.106$)、2005年(edf = 1, $p = 0.055$)、2010年(edf = 1.44, $p = 0.145$)、2015年(edf = 1.576, $p = 0.166$)和2020年(edf = 1, $p = 0.073$)五个时间节点的分析结果显示, UPR与LE之间既未呈现显著的线性关联,也未表现出明显的非线性关联。值得注意的是, $PM_{2.5}$ 浓度对LE的影响模式与UPR具有相似性,均未显示出显著的相关性。

与之形成鲜明对比的是,人均国民总收入(GNI_{pc})与LE的关系呈现出不同的特征。2000~2020年期间, GNI_{pc} 与LE始终保持着显著的非线性关系(edf = 8.570, $p < 0.01$),这一结果表明经济发展水平对预期寿命的影响具有持续且显著的非线性特征。

GNI_{pc} (人均国民总收入)与 LE (预期寿命)之间的关系呈现显著的非线性特征(见图 3)。具体而言,在 2005 年,当 GNI_{pc} 处于 0 至 20,000 美元区间时,LE 呈现快速增长趋势;然而,当 GNI_{pc} 超过 20,000 美元后,LE 的增长速率显著减缓,曲线趋于平缓。类似地,2010 年的数据也显示出相同的规律:在 GNI_{pc} 达到 20,000 美元之前,LE 快速增长,而超过这一阈值后,LE 的增长趋于平稳。值得注意的是,2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的 LE 变化趋势相似,这表明 LE 与 GNI_{pc} 之间的非线性关系具有稳定性。

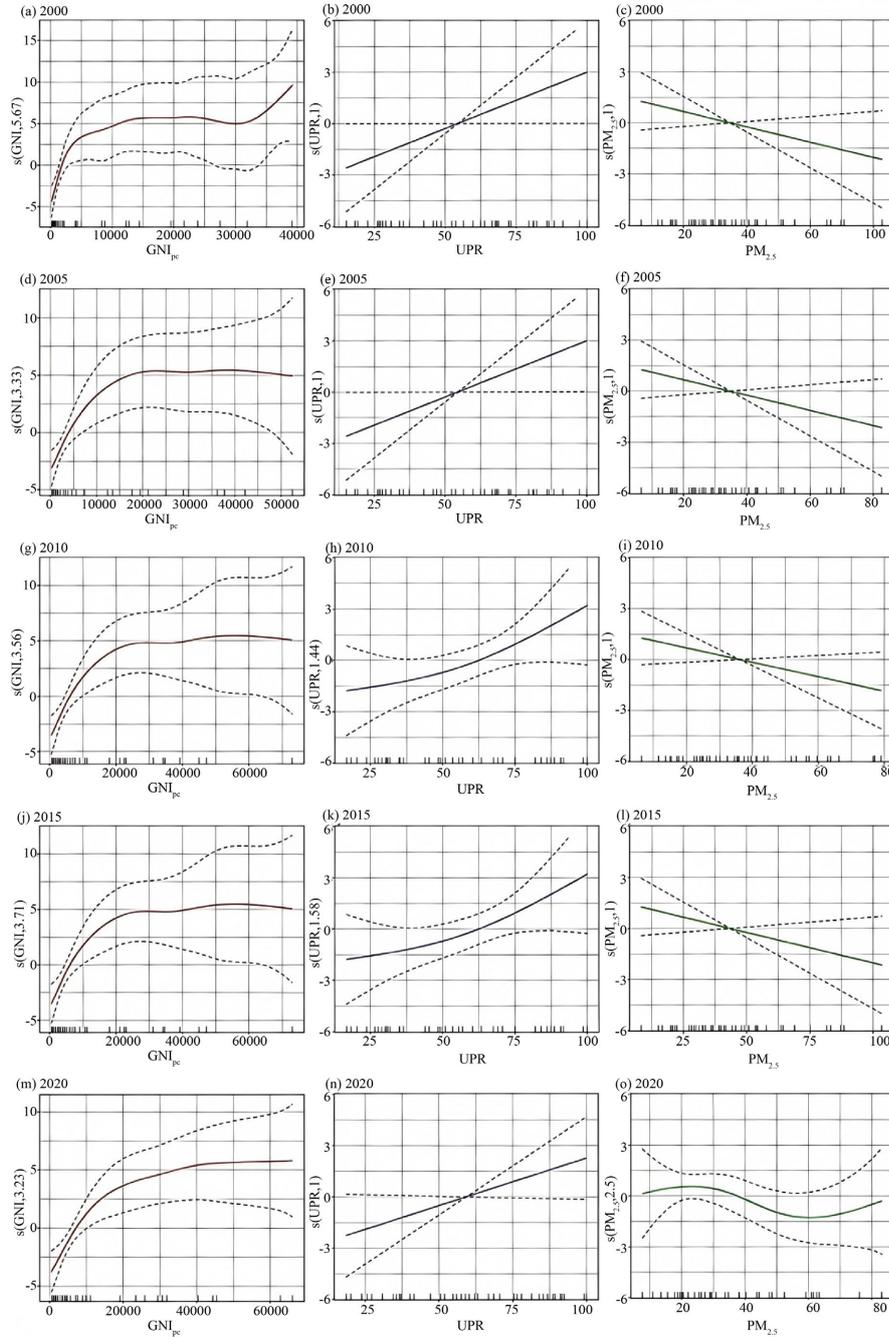


Figure 3. Response curve of nonlinear relationship between LE and GNI_{pc}, UPR and PM_{2.5} under GAM model from 2000 to 2020 (X-axis: explanatory variables; Y-axis: smoothing function)

图 3. 2000~2020 年 GAM 模型下 LE 与 GNI_{pc}、UPR、PM_{2.5} 非线性关系的响应曲线(x 轴: 解释变量; y 轴: 平滑函数)

相比之下, UPR 和 PM_{2.5} 对 LE 的影响模式与 GNI_{pc} 存在显著差异(见图 3)。统计分析显示, 在 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年五个时间节点上, UPR 和 PM_{2.5} 与 LE 的关系均未达到显著性水平(p 值均 >0.05), 既未表现出线性相关性, 也未呈现非线性相关性。

综上所述, 从时间维度来看, GNI_{pc} 与 LE 之间始终保持着稳定的非线性关系, 而 UPR 和 PM_{2.5} 对 LE 的影响则未表现出显著的线性或非线性关联。

4.3. 空间差异

研究结果揭示了亚洲不同地区 LE 与 GNI_{pc}、UPR 和 PM_{2.5} 之间非线性关系的显著差异(见表 4)。通过广义加性模型(GAM)分析, 东亚(AIC = 237.514)、中亚(AIC = 212.645)和南亚(AIC = 222.137)的区域模型 AIC 值显著低于西亚(AIC = 872.093)和东南亚(AIC = 593.93), 表明前三个区域的 LE 水平受到解释变量的非线性影响更为显著。

Table 4. Spatial variation diagram of modeling parameters based on generalized additive modeling

表 4. 基于广义加性建模的建模参数空间变化图

地区	变量	edf	Ref.df	F	p 值	调整后的 R ²	AIC
东亚	GNI _{pc}	2.728	3.34	24.209	$<2e-16^{***}$	0.932	237.514
	UPR	1.666	1.877	4.535	0.0174***		
	PM _{2.5}	4.482	5.391	13.66	$<2e-16^{***}$		
中亚	GNI _{pc}	6.416	7.546	7.394	4.37E-06	0.594	212.645
	UPR	1	1	5.447	0.0240***		
	PM _{2.5}	5.388	6.524	2.512	0.0281***		
南亚	GNI _{pc}	4.613	5.671	70.716	$<2e-16^{***}$	0.968	222.137
	UPR	2	2	15.825	2.42E-06		
	PM _{2.5}	5.816	6.902	12.443	$<2e-16^{***}$		
西亚	GNI _{pc}	8.399	8.892	23.326	$<2e-16^{***}$	0.918	872.093
	UPR	1.990	2	58.842	$<2e-16^{***}$		
	PM _{2.5}	7.254	8.283	23.457	$<2e-16^{***}$		
东南亚	GNI _{pc}	8.770	8.974	18.51	$<2e-16^{***}$	0.853	593.930
	UPR	1	1	7.535	0.0070***		
	PM _{2.5}	7.004	8.099	6.750	5.24E-07		

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。

具体而言, 在南亚地区, GNI_{pc} (edf = 4.613, $p < 0.01$)、UPR (edf = 2, $p < 0.01$)和 PM_{2.5} (edf = 5.816, $p < 0.01$)均与 LE 水平呈现显著的非线性关系, 且其影响模式与西亚地区基本一致。在东亚地区, GNI_{pc} (edf = 2.728, $p < 0.01$)和 PM_{2.5} (edf = 4.482, $p < 0.01$)与 LE 水平存在显著的非线性相关性, 而 UPR 的影响虽具有统计学意义(edf = 1.666, $p = 0.017$), 但非线性特征不明显。东南亚地区则表现出 GNI_{pc} (edf = 8.77, $p < 0.01$)和 PM_{2.5} (edf = 7.004, $p < 0.01$)与 LE 水平的显著非线性关系, 但 UPR 未呈现非线性相关性(edf = 1, $p = 0.007$)。

中亚地区的研究结果显示, GNI_{pc} 与 LE 水平存在显著的非线性关系(edf = 6.416, $p < 0.01$), 而 PM_{2.5} 的影响虽具有统计学意义(edf = 5.388, $p = 0.028$), 但非线性特征较弱。值得注意的是, UPR 在该地区对

LE 水平的影响表现为线性关系(edf = 1, p = 0.024), 而非非线性关系。

此外, 研究发现 GNI_{pc} 对 LE 的影响呈现明显的阈值效应: 从起点到拐点区间, LE 随 GNI_{pc} 增长快速上升; 而超过拐点后, LE 的增长速率显著减缓。这一现象在不同地区间表现出显著差异(见图 4)。

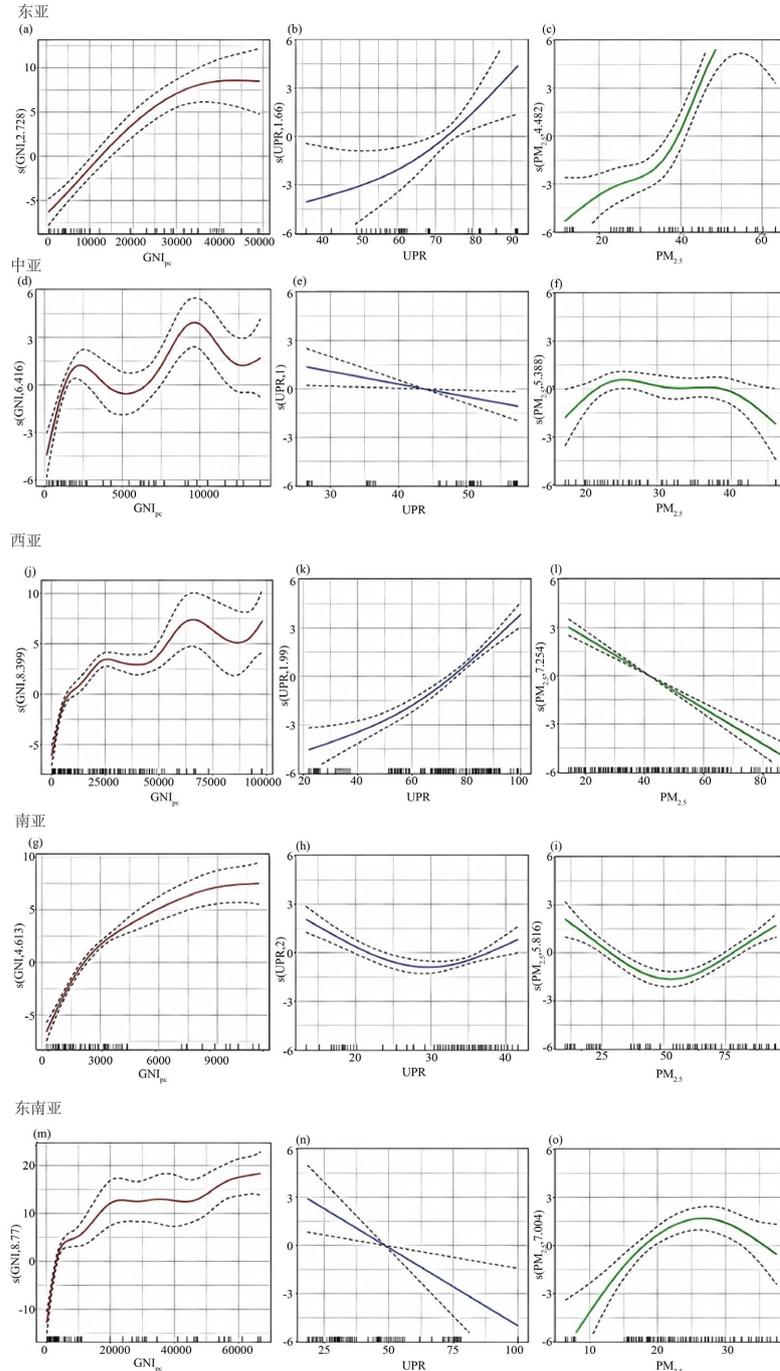


Figure 4. GAM response curves of nonlinear relationship between LE and GNI_{pc} , UPR and $PM_{2.5}$ in different regions of Asia (X-axis: explanatory variables; Y-axis: LE smoothing function; Solid line: variable relationship; Dotted line: 95% confidence interval)

图 4. 亚洲不同地区 LE 与 GNI_{pc} 、UPR、 $PM_{2.5}$ 非线性关系的 GAM 响应曲线(x 轴: 解释变量; y 轴: LE 平滑函数; 实线: 变量关系; 虚线: 95%置信区间)

5. 讨论

社会经济因素和空气污染对预期寿命(LE)具有重要影响。然而,关于亚洲地区 LE 与这些因素之间非线性关系的研究仍然有限。本研究首次基于 2000 年至 2020 年亚洲各国的面板数据,全面探讨了社会经济和空气污染对 LE 的线性和非线性影响,并揭示了这些关系的时空变化和差异。以下是对研究结果的进一步讨论。

首先,绝对收入水平(通常以人均国民总收入衡量)与预期寿命之间存在显著的正相关关系,即收入水平越低,LE 越低。跨国比较研究表明,人均国民生产总值与 LE 之间存在显著的正相关关系,这种关系主要通过收入对贫困人口收入和公共支出(尤其是健康支出)的影响来实现。类似地, Kim (2016) [14]对 178 个国家的研究以及 Chetty 等人(2016) [15]对美国的研究均发现收入与 LE 之间存在显著的正相关关系。此外,不同经济发展水平的国家中,收入与 LE 的关系可能表现出不同的特征。例如, Preston (1975) [16]提出,在低收入水平下,收入的增加与 LE 的显著提升相关,而在高收入水平下,收入的进一步增加对 LE 的影响较小。Rodgers (1979) [17]通过国际横截面分析,构建了收入与 LE 之间的非线性关系模型。进一步研究表明,当国家达到一定的收入阈值后,人均国民总收入的增长与 LE 的提升不再显著相关(Wilkinson, 1992) [18]。具体而言,人口健康状况与平均收入水平直接相关,尤其是在人均国民总收入低于 5000~10000 美元的阈值时,而超过该阈值后,这种关系不再显著(Wilkinson, 1996) [19]。Linden 和 Ray (2017) [20]提出的绝对收入假说表明,LE 与绝对收入水平呈正相关,且随着收入的增加,这种关系的斜率逐渐减小。本研究的结果进一步证实,在 2000 年至 2020 年期间, GNI_{pc} 与 LE 之间表现出持续的非线性关系。具体而言,当 GNI_{pc} 从原点增长至约 7000 美元时,LE 增长迅速;当 GNI_{pc} 从 7000 美元增至 37500 美元时,LE 增长趋于平缓;而当 GNI_{pc} 超过 37500 美元后,LE 呈现波动下降趋势。基于 GAM 模型和亚洲各国的面板数据,本研究进一步揭示了 LE 与 GNI_{pc} 之间的复杂关联。

其次,城市化在决定 LE 方面也发挥着重要作用。例如, Kalediene 和 Petrauskiene (2000) [21]对立陶宛的研究、Shahbaz 等人(2016) [22]对巴基斯坦的研究,以及其他国家层面的研究均表明城市化与 LE 之间存在显著关联。Wang (2018) [23]基于 1990~2012 年 163 个国家的数据,发现城市化与全球健康呈正相关,城市化每增加 1%,LE 增加 0.01 年。然而,也有研究表明,城市化可能导致健康水平下降,尤其是在城市地区。与以往研究不同,本研究基于 GAM 模型的结果表明,2000 年至 2020 年期间,亚洲地区的 UPR 与 LE 之间整体呈现出显著的非线性关系,并进一步揭示了这种关系的时空差异和变化。

第三,本研究还揭示了 $PM_{2.5}$ 与 LE 之间的复杂关系。大量研究表明,长期暴露于 $PM_{2.5}$ 与 LE 的降低有关,且这种关系在跨国层面也得到了验证。然而,大多数研究基于线性模型,而 $PM_{2.5}$ 与 LE 之间的非线性关系尚未得到充分探索。本研究填补了这一空白,揭示了 2000 年至 2020 年期间,亚洲地区 $PM_{2.5}$ 对 LE 的整体非线性影响。此外,基于中国多个城市的每日数据,Guo 等人(2013)、Zhu 等人(2017)和 Cheng 等人(2021)利用分布式滞后非线性模型,发现 $PM_{2.5}$ 与寿命损失年数之间存在非线性浓度-响应关系。本研究的结果进一步支持了这些发现,表明 $PM_{2.5}$ 对 LE 的影响在亚洲地区呈现出显著的非线性特征。

随着国家经济水平的提高, GNI_{pc} 对 LE 的影响逐渐减弱,甚至在最富裕的国家中,这种影响可能完全消失(Marmot & Wilkinson, 2001) [24]。因此,随着经济增长,越来越多的国家可能表现出 LE 从经济发展中受益的减弱趋势。另一方面,环境 $PM_{2.5}$ 对 LE 的影响在亚洲发展中国家尤为显著(Apte *et al.*, 2018) [25]。Wang 等人(2021)最近发现, GDP_{pc} 与 $PM_{2.5}$ 的交互项具有显著的负系数,表明 $PM_{2.5}$ 对经济发展的 LE 效益产生了负面影响。这表明,随着时间的推移, $PM_{2.5}$ 与 LE 之间的关系可能变得更加复杂。

最后,本研究也存在一些局限性。首先,尽管本研究系统地揭示了社会经济因素和空气污染对亚洲国家层面预期寿命及其时空异质性的非线性影响,但受限于数据的可获得性,并且亚洲部分国家的省级

数据尚未公开或存在统计口径差异,本研究无法进一步验证省级层面的空间异质性。然而,通过空间自相关检验与文献对比,我们间接地揭示了国家内部潜在的分异性规律。例如,本研究发现 $PM_{2.5}$ 与 LE 的负相关关系在低收入国家中较弱,而现有研究表明,这一关系在印度北方邦等污染热点区域可能显著增强[26]。在未来,可以通过推动数据开放共享、政策试点等多种方法弥补当前研究的局限。其次,人口统计学和行为学因素,如性别比例、年龄结构、吸烟、饮酒和饮食结构等,也是影响 LE 的重要因素。未来的研究可以在 GAM 模型中纳入更多相关变量。第三,由于线性和非线性关系的复杂性以及未考虑的混杂因素,本研究难以得出具体的政策推论。最后, GAM 作为一种灵活有效的方法,揭示了 LE 与影响因素之间的非线性关系,未来的研究应进一步探讨这些因素之间的相互作用。

6. 结论

本研究基于 2000 年至 2020 年的时间序列数据,采用广义加性模型(GAM)探讨了亚洲范围内预期寿命(LE)与社会经济因素(GNI_{pc} 、UPR)及空气污染($PM_{2.5}$)之间的非线性关系。研究结果表明,在亚洲范围内, $PM_{2.5}$ 、 GNI_{pc} 、UPR 与 LE 之间均存在显著的非线性关系。从时间变化来看,2000 年至 2020 年间, GNI_{pc} 对 LE 的影响表现出稳定的非线性关系,而 UPR 和 $PM_{2.5}$ 对 LE 的影响则未表现出显著的线性或非线性关系。

此外,研究揭示了亚洲不同地区 GNI_{pc} 、UPR 和 $PM_{2.5}$ 对 LE 影响的显著差异。在南亚和西亚地区, GNI_{pc} 、UPR 和 $PM_{2.5}$ 均与 LE 呈现显著的非线性关系。在东亚地区, GNI_{pc} 和 $PM_{2.5}$ 与 LE 呈现显著的非线性关系,而 UPR 的影响则未表现出显著的非线性特征。在东南亚地区, GNI_{pc} 和 $PM_{2.5}$ 与 LE 呈现显著的非线性关系,但 UPR 的影响未表现出非线性特征。在中亚地区, GNI_{pc} 与 LE 呈现显著的非线性关系, $PM_{2.5}$ 与 LE 的关系也表现出非线性特征,而 UPR 对 LE 的影响则表现为线性关系。

进一步分析表明,无论收入阶层如何, GNI_{pc} 对 LE 始终保持着显著的非线性影响。随着收入水平的提高,UPR 与 LE 之间的非线性关系逐渐减弱,而 $PM_{2.5}$ 与 LE 之间的非线性关系则逐渐增强。这一发现表明,各影响因素对预期寿命的线性和非线性特征可能与收入水平的发展阶段密切相关。因此,在亚洲范围内, GNI_{pc} 、UPR 和 $PM_{2.5}$ 对 LE 的非线性影响及其在不同区域的时空差异不容忽视。

7. 政策建议及政策含义

本研究揭示了社会经济与空气污染因素对预期寿命(LE)的非线性影响机制,根据本研究得出的相关结论,针对各个区域提出了不同的政策建议。

在南亚与西亚地区,应当构建发展与治理一体化框架的构建,其重点为经济、环境与健康三者的有机统一。在产业升级方面,建议加快推进清洁能源对化石燃料的替代进程,以此提升人均国民总收入(GNI_{pc}),并建立经济增长、城市化与污染治理的联动机制。城市化路径的优化亦不容忽视,需通过城市规划的精细化管理来增强城市人口比率(UPR)对健康的积极效应,具体措施包括增加绿色基础设施的建设投入,从而有效缓解 UPR 对健康可能产生的非线性冲击。此外,针对 $PM_{2.5}$ 与预期寿命(LE)之间的非线性关系,应设定分阶段的减排目标,并加强 $PM_{2.5}$ 减排技术的研发与应用,如实施清洁能源补贴政策等。

在东亚与东南亚地区,污染治理与经济转型的联动效应应得到充分重视。为实现污染的精准治理,需依据 $PM_{2.5}$ 与 LE 的非线性关系,优先治理污染热点区域,并推动区域间的联防联控。同时,结合 $PM_{2.5}$ 与 LE 的非线性拐点,实施“精准治污 + 产业补贴”策略,以促进高污染行业的技术升级。在经济转型支持方面,应充分利用 GNI_{pc} 的非线性效应,加大对健康友好型产业的投资力度,从而避免高收入阶段经济增长对健康收益可能产生的边际递减效应。

对于中亚地区,控制城市化带来的线性风险是当务之急。建议采取线性干预优先的策略,针对 UPR

对 LE 的线性影响, 优先控制快速城市化可能引发的短期健康风险, 如改善贫民窟的卫生条件、加强传染病防控等。同时, 强化公共卫生基础设施建设, 以抑制 UPR 快速上升对健康的直接损害。在经济转型方面, 应充分利用 GNI_{pc} 的非线性效应, 推动能源经济的多元化发展, 增加可再生能源的开发力度, 减少因化石燃料开采而产生的 PM_{2.5} 排放。

基金项目

重庆工商大学大学生国家级创新创业训练计划项目, 202311799014, 绿色发展视角下空气质量对预期寿命的影响机制及空间效应。

参考文献

- [1] WHO Commission on Macroeconomics and Health (2001) Macroeconomics and Health: Investing in Health for Economic Development. Report of the Commission on Macroeconomics and Health. World Health Organization.
- [2] Pashayan, A.R. (2020) 2020 International Science Council and UNDP-A. Pashayan. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29226.64960>
- [3] Science Daily (2017) Low Socioeconomic Status Reduces Life Expectancy and Should Be Counted as a Major Risk Factor in Health Policy, Study Says. The Lancet.
- [4] Zhang, L.Y. and Sun, L.J. (2024) Life Expectancy Gap in Provincial Level District in China and Its Socio-Economic Determinants between 2000 and 2020. *Chinese Journal of Health Policy*, **17**, 45-51.
- [5] Pope, C.A., Ezzati, M. and Dockery, D.W. (2009) Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine*, **360**, 376-386. <https://doi.org/10.1056/nejmsa0805646>
- [6] de Keijzer, C., Agis, D., Ambrós, A., Arévalo, G., Baldasano, J.M., Bande, S., *et al.* (2017) The Association of Air Pollution and Greenness with Mortality and Life Expectancy in Spain: A Small-Area Study. *Environment International*, **99**, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.009>
- [7] Dziubanek, G., Spychała, A., Marchwińska-Wyrwał, E., Rusin, M., Hajok, I., Ćwieląg-Drabek, M., *et al.* (2017) Long-Term Exposure to Urban Air Pollution and the Relationship with Life Expectancy in Cohort of 3.5 Million People in Silesia. *Science of the Total Environment*, **580**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.217>
- [8] Cheng, Z. (2021) Nonlinear Concentration-Response Relationship between PM_{2.5} and Years of Life Lost in Hong Kong. *Environmental Pollution*, **268**, Article 115698.
- [9] Schwartz, J. (1999) Air Pollution and Hospital Admissions for Heart Disease in Eight U.S. Counties. *Epidemiology*, **10**, 17-22. <https://doi.org/10.1097/00001648-199901000-00005>
- [10] Moolgavkar, S.H. (2000) Multistage Models and the A-Bomb Survivor Data: Implications for Carcinogenic Mechanisms? *Radiation Research*, **154**, 705-713. [https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2000\)154\[0705:EDEOTN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2000)154[0705:EDEOTN]2.0.CO;2)
- [11] Torres, R., Mateo, C., Fuentes, M., Palomo, J.M., Ortiz, C., Fernández-Lafuente, R., *et al.* (2002) Reversible Immobilization of Invertase on Sepabeads Coated with Polyethyleneimine: Optimization of the Biocatalyst's Stability. *Biotechnology Progress*, **18**, 1221-1226. <https://doi.org/10.1021/bp020082q>
- [12] Wood, M.H. (2017) Integrating Fossil and Extant Lineages: An Examination of Morphological Space through Time (Araneae: Archaeidae). *The Journal of Arachnology*, **45**, 20-29. <https://doi.org/10.1636/joa-s-16-039.1>
- [13] Wood, S. and Wood, M.S. (2015) Package 'mgcv.' R Package Version 1:29.
- [14] Kim, J.I. and Kim, G. (2015) Country-Level Socioeconomic Indicators Associated with Healthy Life Expectancy: Income, Urbanization, Schooling, and Internet Users: 2000-2012. *Social Indicators Research*, **129**, 391-402. <https://doi.org/10.1007/s11205-015-1107-2>
- [15] Chetty, R., Stepner, M., Abraham, S., Lin, S., Scuderi, B., Turner, N., *et al.* (2016) The Association between Income and Life Expectancy in the United States, 2001-2014. *JAMA*, **315**, 1750-1766. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.4226>
- [16] Preston, S.H. (1975) The Changing Relation between Mortality and Level of Economic Development. *Population Studies*, **29**, 231-248. <https://doi.org/10.1080/00324728.1975.10410201>
- [17] Rodgers, G.B. (1979) Income and Inequality as Determinants of Mortality: An International Cross-Section Analysis. *Population Studies*, **33**, 343-351. <https://doi.org/10.1080/00324728.1979.10410449>
- [18] Wilkinson, R.G. (1992) Income Distribution and Life Expectancy. *BMJ*, **304**, 165-168. <https://doi.org/10.1136/bmj.304.6820.165>
- [19] Wilkinson, R.G. (1996) *Unhealthy Societies: The Afflictions of Inequality*. Routledge.

-
- [20] Linden, M. and Ray, D. (2017) Aggregation Bias-Correcting Approach to the Health-Income Relationship: Life Expectancy and GDP per Capita in 148 Countries, 1970-2010. *Economic Modelling*, **61**, 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2016.12.001>
- [21] Kalediene, R. and Petrauskiene, J. (2000) Regional Life Expectancy Patterns in Lithuania. *The European Journal of Public Health*, **10**, 101-104. <https://doi.org/10.1093/eurpub/10.2.101>
- [22] Shahbaz, M., Loganathan, N., Mujahid, N., Ali, A. and Nawaz, A. (2015) Determinants of Life Expectancy and Its Prospects under the Role of Economic Misery: A Case of Pakistan. *Social Indicators Research*, **126**, 1299-1316. <https://doi.org/10.1007/s11205-015-0927-4>
- [23] Wang, Q. (2018) Urbanization and Global Health: The Role of Air Pollution. *Iranian Journal of Public Health*, **47**, 1644-1652.
- [24] Marmot, M. and Wilkinson, R.G. (2001) Psychosocial and Material Pathways in the Relation between Income and Health: A Response to Lynch *et al.* *BMJ*, **322**, 1233-1236. <https://doi.org/10.1136/bmj.322.7296.1233>
- [25] Apte, J.S., Brauer, M., Cohen, A.J., Ezzati, M. and Pope, C.A. (2018) Ambient PM_{2.5} Reduces Global and Regional Life Expectancy. *Environmental Science & Technology Letters*, **5**, 546-551. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00360>
- [26] Balakrishnan, K., Dey, S., Gupta, T., Dhaliwal, R.S., Brauer, M., Cohen, A.J., *et al.* (2019) The Impact of Air Pollution on Deaths, Disease Burden, and Life Expectancy across the States of India: The Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet Planetary Health*, **3**, e26-e39. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(18\)30261-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(18)30261-4)