DOI:10.12138/j.issn.1671－9638.20264104

·论著·

医疗废物与经济发展的关系—基于珠三角九市的实证研究

杨　婷,曹　敏,丁　玲,田　峥
(安徽医科大学卫生管理学院,安徽 合肥　231200)

[摘　要] **目的**　检验医疗废物的产生是否符合环境库兹涅茨曲线(EKC),并探析教育水平、城镇化水平、医疗服务能力、公共健康水平等因素对医疗废物产生量(MWG)的影响。**方法**　运用 EKC 分析经济发展对 MWG 的直接影响,结合空间杜宾模型(SDM)与中介效应模型,分析经济发展对 MWG 的间接影响。**结果**　经济发展水平的一次项、三次项系数为正(均 $P<0.01$),二次项系数为负($P<0.01$),表明珠江三角洲地区九个主要城市(珠三角九市)MWG 与经济发展呈"N 型"曲线关系。中介效应模型检验结果显示,医疗机构出院量和经济发展水平的系数均为正(均 $P<0.01$),表明中介效应成立;SDM 模型检验结果显示,经济发展水平和人口规模的空间滞后项系数为负(均 $P<0.05$),表明空间溢出效应存在。**结论**　医疗废物的产生不符合 EKC 假说,经济发展既直接促进医疗废物产生,又以医疗机构出院量为中介间接推动其增长。邻近城市的经济发展与人口集聚对本市 MWG 具有显著影响。

[关　键　词] 医疗废物;经济发展;空间计量模型;珠三角地区
[中图分类号] R181.3+2

Relationship between medical waste and economic development: evidence from 9 cities in the Pearl River Delta

YANG Ting, CAO Min, DING Ling, TIAN Zheng (*School of Health Services Management, Anhui Medical University, Hefei* 231200, *China*)

[**Abstract**] **Objective**　To test whether the generation of medical waste conforms to the environmental Kuznets curve (EKC), and to explore the impact of factors such as education level, urbanization level, medical service capacity, and public health level on the amount of medical waste generation (MWG). **Methods**　The EKC was adopted to analyze the direct impact of economic development on MWG. Combined with the spatial Durbin model (SDM) and mediation effect model, the indirect impact of economic development on MWG was further investigated. **Results**　The linear and cubic coefficients of economic development were positive (both $P<0.01$), while the binomial coefficient was negative ($P<0.01$), demonstrating a N-shaped curve relationship between MWG and economic development in 9 main cities in the Pearl River Delta. The results of the mediation effect model test showed that the coefficients of hospital discharge volume and economic development level of medical institutions were both positive (both $P<0.01$), indicating the existence of the mediation effect; the SDM model test results showed that the spatial lag coefficients of economic development level and population size were negative (both $P<0.05$), indicating the existence of spatial spillover effect. **Conclusion**　The generation of medical waste does not conform to the EKC hypothesis, economic development not only directly promotes the generation of medical waste, but also indirectly drives its growth through the discharge volume of medical institutions. Economic development and population agglomeration of neighboring cities have a significant impact on the MWG of this city.

[**Key words**] medical waste; economic development; spatial econometric model; Pearl River Delta region

[收稿日期] 2025－12－30
[基金项目] 国家自然科学基金青年基金项目(72301006)
[作者简介] 杨婷(1988－),女(汉族),江西省抚州市人,副教授,主要从事资源环境评价研究。
[通信作者] 杨婷　E-mail: yangting@ahmu.edu.cn

随着医疗卫生事业的快速发展，人们对医疗健康服务的需求持续攀升，在此过程中产生的各类医疗废物规模也不断扩大[1]。作为一种典型的固体废物，医疗废物产生量（medical waste generation，MWG）不仅与区域医疗服务规模及水平直接相关，还受到当地经济发展水平等多种因素的综合影响[2-4]。目前，已有相关研究[5-9]采用固定效应模型、简单线性回归等方法，对 MWG 的影响因素进行分析，但尚未关注到医疗废物产生过程中可能存在的空间聚集效应，也未深入揭示经济发展影响医疗废物产生的内在机制。

环境库兹涅茨曲线（environmental Kuznets curve，EKC）是评价城市固体废物产生与经济发展关系的重要模型[10-11]。为探讨采用 EKC 描述医疗废物随经济增长变化趋势的可行性，本文基于珠江三角洲地区九个主要城市（珠三角九市）2013 — 2021 年的面板数据，结合空间自相关分析、EKC 模型、空间计量模型及中介效应模型，探究医疗废物产生的空间聚集效应，分析经济发展对医疗废物产生的直接和间接影响。

1　资料与方法

1.1　变量选取

1.1.1　被解释变量与核心解释变量　目前，国内外学者主要基于 EKC 研究环境污染与经济发展水平间的关系，并多以工业污染物排放量相关指标衡量环境污染水平。本文主要探讨 MWG 与经济发展水平间的关系，故选取各城市 MWG 作为被解释变量，经济发展水平作为核心解释变量，采用人均地区生产总值（per capita gross domestic product，PGDP）度量。

1.1.2　控制变量　医疗废物的产生受多因素影响。Chhay 等[12]指出，城市人口增长和地区生产总值（gross domestic product，GDP）是影响城市固体废物产生量的主要因素。Ansari 等[7]认为，医院固体废物的数量和质量取决于区域经济和文化水平。Lu 等[13]研究发现，教育水平对提高公共卫生水平具有重要作用。此外，医疗机构床位数量和医务人员数量也是影响医疗废物产生的重要因素[14]。分级诊疗是我国重要的医疗政策，其实施可节约诊疗服务资源[15]，进而减少医疗废物的产生。

因此，本文从人口规模、人口健康水平、教育水平、医疗服务能力、医疗政策等方面选择控制变量。主要包括：① 卫生健康支出占财政支出的比重（HEF），用于反映政府对医疗卫生事业重视程度。政府加大对卫生健康支出的财政投入，可有效缓解居民就医问题，提高居民对医疗服务的使用率，从而增加 MWG。②每千常住人口占有卫生机构卫生技术人员数（PHT），用于反映一个地区的医疗服务能力。医疗能力的提高有助于改善居民健康，从而减少医疗资源消耗。③平均每万人口在校学生数（普通高等学校，SS），用于反映居民教育水平。④年末常住人口数（APT），用于反映一个地区的人口规模。⑤人口总死亡率（TMR），用于反映公共健康水平。总死亡率越低，说明公共健康状况越好。

参考现有研究[16]，以 2017 年为节点，建立虚拟变量 $FJZL_{it}$ 分析分级诊疗政策（FJZL）实施对医疗废物产生的影响，当年份 $t \geqslant 2017$ 时，$FJZL_{it} = 1$，否则，$FJZL_{it} = 0$。各变量的描述性统计见表 1。

表 1　MWG 及其影响因素的各变量说明与描述性统计

Table 1　Explanation and descriptive statistics of each variable of MWG and its influencing factor

变量	单位	均值	标准差	最小值	最大值
MWG	吨	8 215.416	7 910.550	1 500.000	35 100.000
PGDP	元/人	92 260.440	36 144.390	36 170.720	173 663.000
APT	万人	797.548	508.922	159.030	1 881.060
TMR	‰	4.502	1.926	1.070	9.790
FJZL	-	0.556	0.500	0	1
HEF	%	8.425	3.043	1.349	17.366
PHT	人/千人	6.955	1.528	4.680	10.980
每千常住人口占有卫生机构床位数（PB）	床/千人	4.355	0.904	2.750	6.540
医院病床使用率（HBR）	%	80.236	7.253	64.400	97.400
SS	人/万人	238.067	236.692	54.974	799.315
医疗机构出院人次数（DV）	万人次	101.317	77.217	21.300	344.500

注：FJZL 为虚拟变量，不存在实际度量单位，- 代表该变量无单位。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 研究资料主要来自经济发达、医疗资源密集的珠三角九市，即广东省的广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、惠州和肇庆市。各变量原始数据主要来源于 2013－2021 年的《广东省统计年鉴》《广东省卫生健康统计年鉴》《广东社会统计年鉴》，以及珠三角九市各城市历年统计年鉴、历年国民经济和社会发展统计公报及历年固体废物污染环境防治信息等。对于少数城市指标的缺失数据，采用线性插值法或均值法进行补全。为消除异方差对回归结果的影响，对所有变量数据取自然对数。

1.2.2 空间自相关分析 采用空间自相关性检验，分析珠三角九市 MWG 和经济发展水平间的空间相关性。单变量的全局空间自相关检验用于衡量属性值在整个区域的空间关联程度，以莫兰指数（*Moran's I*）度量，计算公式如下：

$$I=\frac{[n\Sigma_{i=1}^{n}\Sigma_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\overline{x})(x_j-\overline{x})]}{[\Sigma_{i=1}^{n}\Sigma_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\overline{x})^2]} \quad (1)$$

其中，n 为城市数量；x 和 $\overline{x}$ 为变量及其均值；W_{ij} 为空间权重。莫兰指数的取值一般介于－1 和 1 之间，＞0 表示存在正空间相关性，＜0 表示存在负空间相关性，＝0 表示无空间相关性。

1.2.3 空间计量模型 库兹涅茨曲线最早由美国经济学家西蒙·库兹涅茨（Simon Smith Kuznets）提出，分析环境变量与经济增长之间的关系是其应用最多的重要领域之一。帕纳约托（Panayotou）将环境质量与人均收入间的倒 U 型曲线关系定义为 EKC。目前，国内外学者基于 EKC 选取不同的环境和经济变量指标，针对不同的国家或地区，聚焦不同的时间阶段等，开展了丰富的研究[17~21]，但关于医疗废物的相关研究仍然较少。为此，本文建立三次对数回归模型，以检验珠三角九市 MWG 与经济增长之间是否存在 EKC 效应。具体模型如下：

$$lnY_{it}=\beta_0+\beta_1 lnPGDP_{it}+\beta_2(lnPGDP_{it})^2+\beta_3(lnPGDP_{it})^3+\varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$lnY_{it}=\beta_0+\beta_1 lnPGDP_{it}+\beta_2(lnPGDP_{it})^2+\beta_3(lnPGDP_{it})^3+\Sigma_{k=1}^{m}\alpha_k X_{itk}+\varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$lnY_{it}=\beta_0+\beta_1 lnPGDP_{it}+\Sigma_{k=1}^{m}\alpha_k X_{itk}+\varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中，Y_{it} 表示 i 地区在第 t 年的 MWG；$PGDP_{it}$ 表示 i 地区在第 t 年的 PGDP；ε_{it} 为随机误差项；X_{itk} 分别表示 HEF、PHT、SS、APT、TMR、FJZL 等控制变量，α_k 表示第 k 个控制变量的模型估计系数，m 表示模型中控制变量的总个数；β_1、β_2、β_3 分别表示 $lnPGDP$ 的一次项、二次项、三次项的模型估计系数；β_0 是常数项。模型(2)为模型(3)的简化，模型(4)为线性模型。

为进一步探究 MWG 的空间效应，参考已有研究[22]，在上述模型中引入空间变量，构建空间计量模型分析经济发展对医疗废物的影响。常用的空间计量模型包括空间滞后模型（spatial lag model，SLM）、空间误差模型（spatial error model，SEM）及空间杜宾模型（spatial Durbin model，SDM），本文主要建立 SDM，具体模型如下：

$$lnY_{it}=\beta_0+\beta_1 lnPGDP_{it}+\beta_2(lnPGDP_{it})^2+\beta_3(lnPGDP_{it})^3+\rho_o WlnY_{it}+\rho_1 WlnPGDP_{it}+\rho_2 W(lnPGDP_{it})^2+\rho_3 W(lnPGDP_{it})^3+\varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$lnY_{it}=\beta_0+\beta_1 lnPGDP_{it}+\beta_2(lnPGDP_{it})^2+\beta_3(lnPGDP_{it})^3+\Sigma_{k=1}^{m}\alpha_k X_{itk}+\rho_0 WlnY_{it}+\rho_1 WlnPGDP_{it}+\rho_2 W(lnPGDP_{it})^2+\rho_3 W(lnPGDP_{it})^3+\Sigma_{k=1}^{m}\gamma_k WX_{itk}+\varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$lnY_{it}=\beta_0+\beta_1 lnPGDP_{it}+\Sigma_{k=1}^{m}\alpha_k X_{itk}+\rho_0 WlnY_{it}+\rho_1 WlnPGDP_{it}+\Sigma_{k=1}^{m}\gamma_k WX_{itk}+\varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中，W 表示空间权重矩阵，本文主要采用邻接空间权重矩阵；X_{itk} 表示控制变量；ρ_0 表示空间自回归系数，ρ_1、ρ_2、ρ_3 分别表示 $lnPGDP$ 的一次项、二次项、三次项的空间滞后项系数；γ_k 表示第 k 个控制变量的空间滞后项系数；其他符号的具体含义与模型(3)相同。

1.2.4 中介效应模型 为检验经济增长是否以医疗机构服务状况为中介来调节其对 MWG 的影响，建立如下模型：

$$lnDV_{it}=\beta_0+a_1 lnPGDP_{it}+a_2 lnPHT_{it}+a_3 lnAPT_{it}+a_4 lnSS_{it}+\varepsilon_{it} \quad (8)$$

$$lnMWG_{it}=\beta_0+b_1 lnPGDP_{it}+b_2 lnDV_{it}+b_3 lnTMR_{it}+b_4 lnHBR_{it}+b_5 lnPB_{it}+\varepsilon_{it} \quad (9)$$

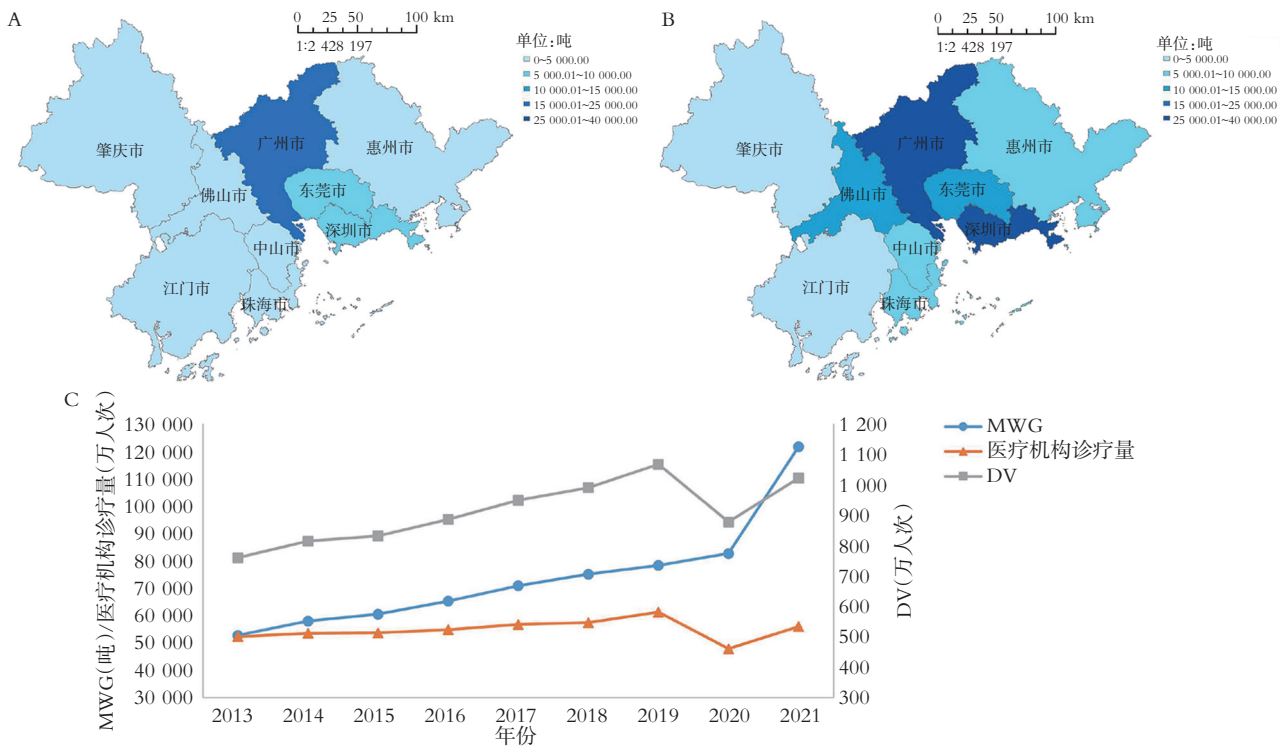
其中，MWG_{it} 表示 i 地区在第 t 年的 MWG；DV_{it} 表示 i 地区在第 t 年的 DV，用来反映该地区的医疗机构服务状况；a_1～a_4 分别表示 $lnPGDP$、$lnPHT$、$lnAPT$、$lnSS$ 的模型估计系数；HBR_{it} 表示 i 地区在第 t 年的 HBR；PB_{it} 表示 i 地区在第 t 年的 PB；TMR_{it} 表示 i 地区在第 t 年的死亡率；b_1～b_5 分别表示 $lnPGDP$、$lnDV$、$lnTMR$、$lnHBR$、$lnPB$ 的模型估计系数；ε_{it} 为随机误差项，β_0 是常数项。

本研究以 P 值作为判定变量系数统计显著性

的核心依据，选取 10%、5%、1%三个经典显著性水平作为检验阈值。

2　结果

2.1　MWG 的时序演变趋势　各城市 MWG 均有明显增长，且城市间存在差异，广州和深圳的 MWG 明显高于江门和肇庆等市，见图 1A、B。珠三角九市 2013—2021 年 MWG 与医疗机构服务情况的时间演变趋势显示，2020—2021 年 MWG 大幅度增加，见图 1C，推测与 2019 年年末暴发的新型冠状病毒（新冠）感染有关。为检验新冠感染对研究结论的影响，本研究对 2013—2019 年、2013—2021 年两个时间段样本进行对比分析。



注：A 为 2013 年珠三角九市 MWG；B 为 2021 年珠三角九市的 MWG；C 为 2013—2021 年珠三角九市 MWG 与医疗服务情况的时间演变趋势。

图 1　珠三角九市 MWG 的时空演变趋势

Figure 1　Spatiotemporal evolution trend of MWG in 9 cities in the Pearl River Delta

2.2　经济发展对医疗废物的直接影响　采用静态 EKC 模型检验 MWG 与经济发展水平间的关系，检验结果见表 2。采用 *Hausman* 检验确定选择固定效应模型还是随机效应模型，如果检验结果为正且 $P<0.05$，采用固定效应模型；如果检验结果为正但 $P>0.05$，采用随机效应模型；如果检验结果为负，选择固定效应模型。结果显示，模型 2 采用随机模型，其余选择固定模型。模型（2）、（3）检验结果表明，2013—2019 年、2013—2021 年两个时间段样本，珠三角九市的 MWG 与经济发展水平均呈现“N 型”曲线关系，且曲线只有一个拐点。基于 2013—2021 年数据样本，控制变量 PHT 和 TMR 的回归系数（α_2 和 α_5）为负（均 $P<0.05$），APT 的回归系数（α_4）为正（$P<0.01$），其他控制变量的回归系数不显著（均 $P>0.1$）。

在此基础上采用全局单变量莫兰指数检验 MWG 和 PGDP 的空间相关性，结果显示，珠三角九市的医疗废物莫兰指数均<0，但没有通过显著性检验，说明医疗废物的空间特征不显著；而珠三角九市经济发展水平的莫兰指数均<0，且 2013—2021 年均通过了显著性检验，表明珠三角九市的经济发展水平均存在负的空间相关性。见表 3。

表 2 珠三角九市 MWG 与经济发展水平的静态 EKC 检验结果

Table 2 Static EKC test results of MWG and economic development level in 9 cities in the Pearl River Delta

模型变量	2013—2019 年						2013—2021 年					
	模型(2)		模型(3)		模型(4)		模型(2)		模型(3)		模型(4)	
	系数	*P*	系数	*P*	系数	*P*	系数	*P*	系数	*P*	系数	*P*
β_1	78.087 (69.823)	0.263	133.363 (65.178)	0.047	0.535 (0.136)	<0.001	233.393 (106.736)	0.029	249.331 (101.597)	0.017	1.274 (0.204)	<0.001
β_2	−7.280 (6.199)	0.240	−12.007 (5.820)	0.045	−	−	−21.318 (9.451)	0.024	−22.302 (9.016)	0.016	−	−
β_3	0.228 (0.183)	0.214	0.361 (0.173)	0.043	−	−	0.651 (0.279)	0.019	0.667 (0.266)	0.015	−	−
α_1	−	−	0.039 (0.033)	0.245	0.020 (0.033)	0.540	−	−	−0.014 (0.057)	0.812	−0.044 (0.059)	0.451
α_2	−	−	0.116 (0.245)	0.962	−0.347 (0.196)	0.083	−	−	−0.760 (0.231)	0.002	−0.998 (0.208)	<0.001
α_3	−	−	−0.012 (0.050)	0.814	−0.002 (0.052)	0.973	−	−	0.145 (0.082)	0.081	0.110 (0.085)	0.200
α_4	−	−	0.565 (0.149)	<0.001	0.786 (0.110)	<0.001	−	−	0.876 (0.250)	0.001	1.175 (0.217)	<0.001
α_5	−	−	−0.106 (0.045)	0.024	−0.104 (0.047)	0.033	−	−	−0.184 (0.071)	0.011	−0.162 (0.074)	0.032
α_6	−	−	0.045 (0.024)	0.068	0.056 (0.024)	0.025	−	−	−0.023 (0.049)	0.647	−0.013 (0.052)	0.804
β_0	−273.205 (261.839)	0.297	−489.530 (242.768)	0.050	−1.810 (1.564)	0.253	−846.535 (401.376)	0.035	−928.737 (381.153)	0.018	−11.740 (2.221)	<0.001
Hausman 检验	0.030	0.988	684.760	<0.001	−43.730		0.080	0.961	102.240	<0.001	41.860	<0.001
R^2	0.806		0.869		0.891		0.759		0.831		0.876	
模型	随机		固定		固定		随机		固定		固定	
曲线形状	N 型		N 型		线性递增		N 型		N 型		线性递增	
拐点	42 081.351		63 070.767		−		55 384.405		68 795.745		−	

注：括号内数字表示稳健的标准误差；− 表示未涉及该项。

表 3 珠三角九市 MWG 与 PGDP 空间自相关检验结果

Table 3 Spatial autocorrelation test results of MWG and PGDP in 9 cities in the Pear River Delta

年份	MWG		PGDP	
	Moran's I	*P*	*Moran's I*	*P*
2013 年	−0.013	0.248	−0.465	0.074
2014 年	−0.026	0.254	−0.467	0.067
2015 年	−0.010	0.235	−0.484	0.056
2016 年	−0.018	0.248	−0.489	0.049
2017 年	−0.036	0.264	−0.477	0.062
2018 年	−0.047	0.277	−0.470	0.064
2019 年	−0.052	0.291	−0.484	0.066
2020 年	−0.071	0.335	−0.478	0.060
2021 年	−0.066	0.332	−0.468	0.067

为规避空间自相关检验与基础相关分析的片面性问题，进一步构建空间计量模型进行实证检验。似然比(likelihood ratio，LR)检验及 Wald 检验结果显示，在 10%的显著性水平条件下，除模型(9)外，其余模型的 SDM 均拒绝退化为 SEM 或 SLM，见表 4，故采用 SDM，分析结果见表 5。基于模型(5)的检验结果绘制 MWG 与经济发展水平间的曲线关系，见图 2。模型(5)～(7)中各变量对 MWG 的影响方向与显著性同模型(2)～(4)的回归检验结果整体保持一致。针对模型(6)进行空间权重矩阵稳健性检验，在邻接权重矩阵与逆距离权重矩阵两种设定下，各变量对 MWG 的影响均未出现明显差异。MWG 与 PGDP 之间呈现“N 型”曲线关系，且 *lnPGDP* 一次项、二次项、三次项的空间滞后项系数 ρ_1、ρ_2、ρ_3 均通过了显著性检验(均 $P<0.01$)。

2.3 经济发展对医疗废物的间接影响 采用中介效应模型[模型(8)、(9)]分析经济发展是否以医疗机构服务状况为中介变量对 MWG 产生影响。模型(8)检验结果显示，lnPGDP 的回归系数 $a1$ 为正($P<0.01$)，且 lnPGDP 的空间滞后项系数 c_1 为负($P<0.05$)；模型(9)检验结果显示，lnDV 和 lnPGDP 的回归系数(b_1 和 b_2)均为正(均 $P<0.01$)，且 lnDV 和 lnPGDP 的空间滞后项系数(d_1 和 d_2)均为负(均 $P<0.1$)，见表 6～7。

表 4　各模型 Wald 检验及 LR 检验结果

Table 4　Wald test and LR test results of each model

模型 检验项目	模型(5)		模型(6)		模型(7)		模型(8)		模型(9)	
	χ^2	P	χ^2	P	χ^2	P	χ^2	P	χ^2	P
Wald 检验	83.880	<0.001	61.370	<0.001	459.390	<0.001	62.190	<0.001	28.580	<0.001
LR 检验(SDM 与 SLM)	13.820	0.003	15.090	0.058	22.730	<0.001	34.230	<0.001	20.080	0.001
LR 检验(SDM 与 SEM)	24.270	<0.001	14.440	0.071	15.190	0.001	24.670	<0.001	5.460	0.363

表 5　珠三角九市 MWG 与经济发展水平的动态 EKC 检验结果

Table 5　Dynamic EKC test results of MWG and economic development level in 9 cities in the Pearl River Delta

模型 变量	2013—2019 年								2013—2021 年							
	模型(5)		模型(6)/邻接		模型(6)/逆邻接		模型(7)		模型(5)		模型(6)/邻接		模型(6)/逆邻接		模型(7)	
	系数	P	系数	P	系数	P	系数	P	系数	P	系数	P	系数	P	系数	P
β_1	201.254 (1.448)	<0.001	64.533 (24.998)	0.010	99.749 (24.185)	<0.001	0.503 (0.178)	0.005	379.193 (1.140)	<0.001	93.615 (32.439)	0.004	279.901 (57.144)	<0.001	1.132 (0.247)	<0.001
β_2	−18.118 (1.125)	<0.001	−5.702 (2.223)	0.010	−8.888 (2.176)	<0.001	−	−	−34.179 (1.115)	<0.001	−7.907 (2.886)	0.006	−24.626 (5.158)	<0.001	−	−
β_3	0.544 (0.005)	<0.001	0.169 (0.066)	0.011	0.265 (0.065)	<0.001	−	−	1.028 (0.006)	<0.001	0.225 (0.086)	0.009	0.724 (0.155)	<0.001	−	−
α_1	−	−	0.053 (0.031)	0.085	0.122 (0.033)	<0.001	0.055 (0.032)	0.085	−	−	0.029 (0.061)	0.636	0.142 (0.045)	0.002	0.032 (0.064)	0.619
α_2	−	−	−0.321 (0.402)	0.424	0.028 (0.298)	0.926	−0.392 (0.312)	0.208	−	−	−0.876 (0.338)	0.010	0.099 (0.272)	0.715	−0.552 (0.329)	0.093
α_3	−	−	−0.053 (0.058)	0.355	−0.073 (0.060)	0.223	−0.002 (0.047)	0.961	−	−	0.033 (0.104)	0.751	−0.208 (0.076)	0.006	0.020 (0.091)	0.823
α_4	−	−	0.254 (0.180)	0.159	0.755 (0.262)	0.004	0.542 (0.139)	<0.001	−	−	1.079 (0.337)	0.001	1.674 (0.332)	<0.001	1.232 (0.279)	<0.001
α_5	−	−	−0.077 (0.041)	0.062	−0.108 (0.041)	0.009	−0.077 (0.043)	0.076	−	−	−0.079 (0.069)	0.254	−0.083 (0.050)	0.096	−0.093 (0.071)	0.191
α_6	−	−	0.046 (0.031)	0.142	0.110 (0.058)	0.057	0.054 (0.031)	0.080	−	−	−0.048 (0.054)	0.375	0.160 (0.062)	0.010	−0.043 (0.055)	0.428
ρ_1	−4.294 (1.601)	0.007	−231.096 (38.210)	<0.001	341.506 (19.145)	<0.001	0.307 (0.556)	0.582	−1.190 (1.207)	0.324	−509.668 (48.793)	<0.001	1 340.408 (21.444)	<0.001	0.652 (0.463)	0.159
ρ_2	0.710 (0.278)	0.011	21.071 (3.410)	<0.001	−29.702 (1.525)	<0.001	−	−	0.160 (0.209)	0.444	45.578 (4.276)	<0.001	−116.709 (1.362)	<0.001	−	−
ρ_3	−0.030 (0.012)	0.015	−0.637 (0.102)	<0.001	0.862 (0.050)	<0.001	−	−	−0.006 (0.009)	0.530	−1.354 (0.126)	<0.001	3.391 (0.044)	<0.001	−	−
γ_1	−	−	0.084 (0.060)	0.162	0.305 (0.154)	0.048	0.123 (0.063)	0.051	−	−	−0.000 4 (0.122)	0.997	0.322 (0.201)	0.109	0.044 (0.131)	0.739
γ_2	−	−	−0.342 (0.554)	0.538	−0.841 (1.266)	0.507	0.245 (0.515)	0.634	−	−	0.091 (0.397)	0.819	−3.045 (0.469)	<0.001	−0.111 (0.375)	0.767
γ_3	−	−	−0.060 (0.110)	0.585	−0.258 (0.344)	0.452	−0.060 (0.094)	0.521	−	−	−0.316 (0.162)	0.051	−1.472 (0.305)	<0.001	−0.091 (0.162)	0.572
γ_4	−	−	0.221 (0.261)	0.397	−0.457 (0.476)	0.336	−0.062 (0.226)	0.783	−	−	−1.207 (0.495)	0.015	−2.294 (0.517)	<0.001	−1.258 (0.461)	0.006
γ_5	−	−	−0.101 (0.088)	0.247	−0.369 (0.161)	0.022	−0.097 (0.084)	0.251	−	−	−0.025 (0.145)	0.861	−0.724 (0.196)	<0.001	−0.050 (0.140)	0.720
ρ_0	0.267 (0.138)	0.053	−0.211 (0.189)	0.264	−0.665 (0.361)	0.065	−0.395 (0.185)	0.033	0.325 (0.115)	0.005	0.185 (0.151)	0.221	−0.338 (0.203)	0.096	0.132 (0.155)	0.395
β_0	−738.790 (7.160)	<0.001	0.037 (0.004)	<0.001	0.035 (0.004)	<0.001	0.039 (0.004)	<0.001	−1 396.127 (6.956)	−	0.093 (0.008)	<0.001	0.062 (0.005)	<0.001	0.099 (0.008)	<0.001
R^2	0.457		0.294		0.128		0.838		0.542		0.270		0.122		0.818	
曲线形状	N 型		N 型		N 型		线性递增		N 型		N 型		N 型		线性递增	
拐点	66 027.026		76 167.183		72 272.021		−		65 312.188		122 244.4222		84 493.952		−	

注：括号内数字表示稳健的标准误差，− 表示为未涉及该项。

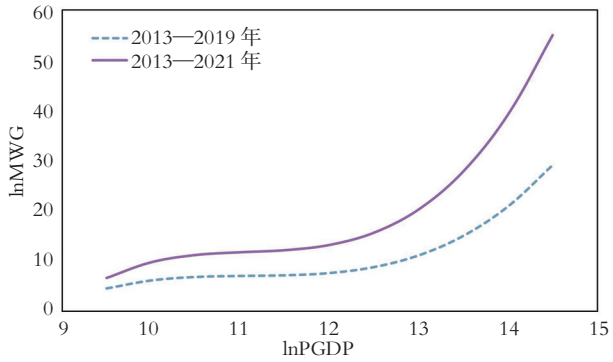


图 2　珠三角九市 MWG 与经济发展水平间的曲线关系

Figure 2　Curve relationship between MWG and economic development level in 9 cities in the Pearl River Delta

表 6　2013—2021 年珠三角九市经济发展水平对医疗机构服务状况的影响

Table 6　Impact of economic development level on the service status of medical institutions in 9 cities in the Pearl River Delta from 2013 to 2021

模型变量	模型(8)		模型(8)的 SDM	
	系数	*P*	系数	*P*
α_1	0.242(0.100)	0.016	0.802(0.115)	<0.001
α_2	0.323(0.124)	0.009	−0.001(0.142)	0.994
α_3	−0.130(0.044)	0.003	−0.095(0.040)	0.018
α_4	0.694(0.086)	<0.001	0.737(0.148)	<0.001
β_0	−2.814(0.782)	<0.001	0.048(0.004)	<0.001
c_1	−	−	−0.366(0.170)	0.031
c_2	−	−	0.484(0.163)	0.002
c_3	−	−	−0.067(0.044)	0.124
c_4	−	−	−0.836(0.163)	<0.001
ρ_0	−	−	0.295(0.110)	0.007
R^2	0.862		0.658	

注：− 表示未涉及该项，c_1～c_4 分别表示 *lnPGDP*、*lnPHT*、*lnAPT*、*lnSS* 的空间滞后项系数。

3　讨论

本文基于 EKC 理论，结合空间计量模型，探析经济发展对 MWG 的影响机制。研究发现，珠三角地区 MWG 存在显著区域差异(见图 1)。模型(2)、(3)、(5)、(6)的检验结果表明，珠三角九市的 MWG 与经济发展水平均呈“N 型”曲线关系(lnPGDP 和 $\ln PGDP^3$ 系数为正，$\ln PGDP^2$ 系数为负，均 $P<0.01$)，且曲线均只有一个拐点，说明MWG随经济发展水平增长存在阶段性变化趋势。这与医疗废物的特殊属性高度相关。医疗废物与民生医疗服务紧密绑定，经济发展推动珠三角九市医疗资源持续完善，医疗服务可及性不断提升，直接带动居民就医需求增长，导致 MWG 阶段性上升，而不同发展阶段的增长差异，本质是珠三角各市经济与医疗发展不均衡的梯度格局。经济发展一方面提升了居民收入与健康意识，使体检成为必需品[23-24]，进而增加就医需求[25-26]，促进 MWG 的增长[27]；另一方面，经济的快速发展促进了医疗卫生体系建设，居民的公共健康水平逐渐改善[28-30]，减少就医行为，从而抑制医疗废物的产生。

表 7　2013—2021 年珠三角九市经济发展水平对 MWG 的间接作用检验结果

Table 7　Test results of indirect impact of economic development level on MWG in 9 cities in the Pearl River Delta from 2013 to 2021

模型变量	模型(9)		模型(9)的 SDM	
	系数	*P*	系数	*P*
b_1	0.430(0.120)	<0.001	0.370(0.126)	0.003
b_2	1.164(0.087)	<0.001	1.152(0.112)	<0.001
b_3	−0.662(0.138)	<0.001	−0.561(0.166)	0.001
b_4	−1.162(0.182)	<0.001	−1.216(0.255)	<0.001
b_5	−0.066(0.062)	0.289	−0.025(0.062)	0.688
β_0	4.806(1.693)	0.005	5.562(1.564)	<0.001
d_1	−	−	−0.233(0.136)	0.086
d_2	−	−	−0.430(0.212)	0.043
d_3	−	−	0.219(0.253)	0.386
d_4	−	−	0.291(0.239)	0.224
d_5	−	−	−0.191(0.106)	0.071
ρ_0	−	−	0.372(0.126)	0.003
R^2	0.946		0.956	

注：括号内数字表示稳健的标准误差，− 表示未涉及该项，d_1～d_5 分别表示 *lnPGDP*、*lnDV*、*lnTMR*、*lnHBR*、*lnPB* 的空间滞后项系数。

模型(8)的检验结果显示，lnPGDP 的回归系数为正，且 $P<0.01$，表明经济发展水平的提高能够有效带动中介变量 DV 的增长。模型(9) lnDV 和 lnPGDP 的回归系数均为正(均 $P<0.01$)，表明 DV 和 PGDP 的提高均会推动 MWG 增加。综合两个模型的检验结果，说明经济发展水平一方面直接影响 MWG，另一方面会以 DV 为中介变量进一步促进医疗废物的产生。

控制变量中，人口规模表现出明显促进作用

(lnAPT 系数为正，$P<0.01$)，这与 Hou 等[16]结论一致，即人口越密集的地区产生的医疗废物越多。医疗服务能力的提高可降低 MWG(lnPHT 的系数为负，$P<0.01$)，表明医疗服务的提质增效能够优化诊疗流程，减少不必要的就医与住院行为，进而降低 MWG。空间滞后项估计结果显示，邻近城市的经济发展水平对本市的 MWG 存在明显空间溢出效应(lnPGDP 的空间滞后项系数为负，$P<0.1$)。经济发达城市多数拥有更优质的医疗资源、更高水平的诊疗服务和更完善的医疗卫生体系，易吸引周边地区患者跨市就医，导致医疗服务需求的区域间流动，进而间接降低周边地区医疗废物的产生规模。同样，邻近城市人口集聚对该市的 MWG 具有显著的空间溢出效应(lnAPT 的空间滞后项系数为负，$P<0.05$)。周边城市的人口集聚能够分流该市居民就医需求，进而对其医疗废物的产生形成抑制作用。珠三角九市医疗废物的产生是经济发展、人口集聚、医疗服务能力及城市间空间关联等多重因素共同作用的结果，其区域医疗废物管控不能采取“一刀切”的单一模式，需兼顾经济发展的阶段性与城市间的空间关联性。

本研究存在一定局限性。变量选取方面，未纳入医疗废物分类合规率等影响其产生的关键变量，也未进一步剖析感染性、病理性等不同类型医疗废物的差异化影响。研究范围方面，样本仅聚焦于珠三角九市，空间覆盖范围相对有限，样本量偏少，可能在一定程度上影响部分效应的估计精度，难以全面揭示更大区域内医疗废物产生的时空演变特征。未来可进一步扩大研究区域与样本规模，纳入更多城市并延长观测时段，同时补充关键影响变量，细化医疗废物分类维度，从而增强研究结论的科学性与普适性。

作者贡献声明：杨婷负责论文初稿撰写；曹敏参与实证结果分析；田峥、丁玲承担数据的收集与整理工作。

利益冲突：所有作者均声明不存在利益冲突。

[参 考 文 献]

[1] Li H, Dietl H, Li JL. Identifying key factors influencing sustainable element in healthcare waste management using the interval-valued fuzzy DEMATEL method[J]. J Mater Cycles Waste Manag, 2021, 23(5): 1777-1790.

[2] Minoglou M, Gerassimidou S, Komilis D. Healthcare waste generation worldwide and its dependence on socio-economic and environmental factors[J]. Sustainability, 2017, 9(2): 220.

[3] Sanida G, Karagiannidis A, Mavidou F, et al. Assessing generated quantities of infectious medical wastes: a case study for a health region administration in Central Macedonia, Greece[J]. Waste Manag, 2010, 30(3): 532-538.

[4] Tesfahun E, Kumie A, Beyene A. Developing models for the prediction of hospital healthcare waste generation rate[J]. Waste Manag Res, 2016, 34(1): 75-80.

[5] Windfeld ES, Brooks MSL. Medical waste management-a review[J]. J Environ Manage, 2015, 163: 98-108.

[6] Minoglou M, Komilis D. Describing health care waste generation rates using regression modeling and principal component analysis[J]. Waste Manag, 2018, 78: 811-818.

[7] Ansari M, Ehrampoush MH, Farzadkia M, et al. Dynamic assessment of economic and environmental performance index and generation, composition, environmental and human health risks of hospital solid waste in developing countries: a state of the art of review[J]. Environ Int, 2019, 132: 105073.

[8] Su ECY, Chen YT. Policy or income to affect the generation of medical wastes: an application of environmental Kuznets curve by using Taiwan as an example[J]. J Clean Prod, 2018, 188: 489-496.

[9] Singh N, Ogunseitan OA, Tang YY. Medical waste: current challenges and future opportunities for sustainable management[J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 2022, 52(11): 2000-2022.

[10] Ma Y, Jia LL, Hou YH, et al. The impact of economic growth and tiered medical policy on the medical waste generation: an empirical analysis based on the environmental Kuznets curve model[J]. Front Environ Sci, 2022, 10: 824435.

[11] Cheng JH, Shi FY, Yi JH, et al. Analysis of the factors that affect the production of municipal solid waste in China[J]. J Clean Prod, 2020, 259: 120808.

[12] Chhay L, Reyad MAH, Suy R, et al. Municipal solid waste generation in China: influencing factor analysis and multi-model forecasting[J]. J Mater Cycles Waste Manag, 2018, 20(3): 1761-1770.

[13] Lu ZN, Chen HY, Hao Y, et al. The dynamic relationship between environmental pollution, economic development and public health: evidence from China[J]. J Clean Prod, 2017, 166: 134-147.

[14] Caniato M, Tudor TL, Vaccari M. Assessment of health-care waste management in a humanitarian crisis: a case study of the Gaza Strip[J]. Waste Manag, 2016, 58: 386-396.

[15] 龚秀全，孙晨晗. 我国分级诊疗模式是否能节约医疗资源[J]. 南方经济，2021(5)：34-51.
Gong XQ, Sun CH. Can tiered medical service system in China save medical resources[J]. South China Journal of Economics, 2021(5): 34-51.

[16] Hou YH, Jia LL, Ma WT, et al. Analysing the factors affecting medical waste generation in China[J]. Sustain Chem Pharm, 2023, 32: 100975.

[17] 赵惠，吴金希. 基于环境库兹涅茨曲线的京冀区际环境污染转移的测度研究[J]. 中国人口·资源与环境，2020，30(5)：90－97.
Zhao H, Wu JX. Measurement of environmental pollution transfer in Beijing-Hebei Region based on the environmental Kuznets curve[J]. China Population Resources and Environment, 2020, 30(5): 90－97.

[18] 王俏茹，刘达禹，刘廷宇. 中国城市污染排放的俱乐部收敛特征及其动态演变[J]. 中国管理科学，2024，32(3)：70－81.
Wang QR, Liu DY, Liu TY. The club convergence and its dynamic evolution of urban pollutant emissions in China[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(3): 70－81.

[19] 刘亚，黄安胜. 森林碳汇环境库兹涅茨曲线特征及其影响因素分析[J]. 世界林业研究，2023，36(2)：132－137.
Liu Y, Huang AS. Characteristics and influencing factors of environmental Kuznets curve for forest carbon sequestration[J]. World Forestry Research, 2023, 36(2): 132－137.

[20] Ma XJ, Ahmad N, Oei PY. Environmental Kuznets curve in France and Germany: role of renewable and nonrenewable energy[J]. Renew Energy, 2021, 172: 88－99.

[21] Pata UK, Kartal MT, Erdogan S, et al. The role of renewable and nuclear energy R&D expenditures and income on environmental quality in Germany: scrutinizing the EKC and LCC hypotheses with smooth structural changes[J]. Appl Energy, 2023, 342: 121138.

[22] 戴翔，宋婕. 中国 OFDI 的全球价值链构建效应及其空间外溢[J]. 财经研究，2020，46(5)：125－139.
Dai X, Song J. GVC construction effect of China's OFDI and its spatial spillover[J]. Journal of Finance and Economics, 2020, 46(5): 125－139.

[23] Rajput H, Changotra R, Rajput P, et al. A shock like no other: coronavirus rattles commodity markets[J]. Environ Dev Sustain, 2021, 23(5): 6564－6575.

[24] Wang LD, Wang AJ, FitzGerald G, et al. Who benefited from the new rural cooperative medical system in China? A case study on Anhui Province[J]. BMC Health Serv Res, 2016, 16: 195.

[25] Laaksonen M, Aittomäki A, Lallukka T, et al. Register-based study among employees showed small nonparticipation bias in health surveys and check-ups[J]. J Clin Epidemiol, 2008, 61(9): 900－906.

[26] Schülein S, Taylor KJ, Schriefer D, et al. Participation in preventive health check-ups among 19,351 women in Germany[J]. Prev Med Rep, 2017, 6: 23－26.

[27] Russo G, Rego I, Perelman J, et al. A tale of loss of privilege, resilience and change: the impact of the economic crisis on physicians and medical services in Portugal[J]. Health Policy, 2016, 120(9): 1079－1086.

[28] Chen YT. An examination of the determination of medical capacity under a national health insurance program[J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(7): 1206.

[29] Karagiannidis A, Papageorgiou A, Perkoulidis G, et al. A multi-criteria assessment of scenarios on thermal processing of infectious hospital wastes: a case study for Central Macedonia[J]. Waste Manag, 2010, 30(2): 251－262.

[30] 曲卫华，颜志军. 环境污染、经济增长与医疗卫生服务对公共健康的影响分析——基于中国省际面板数据的研究[J]. 中国管理科学，2015，23(7)：166－176.
Qu WH, Yan ZJ. The influence of environmental pollution, economic growth and healthcare services to public health based on China's provincial panel data[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(7): 166－176.

（本文编辑：翟若南）

本文引用格式：杨婷，曹敏，丁玲，等. 医疗废物与经济发展的关系—基于珠三角九市的实证研究[J]. 中国感染控制杂志，2026，25(7)：978－986. DOI：10.12138/j.issn.1671－9638.20264104.

Cite this article as: YANG Ting, CAO Min, DING Ling, et al. Relationship between medical waste and economic development: evidence from 9 cities in the Pearl River Delta[J]. Chin J Infect Control, 2026, 25(7): 978－986. DOI: 10.12138/j.issn.1671－9638.20264104.