

# Analysis of Driving Factors of Carbon Dioxide Emission Based on GAMLSS Model

Qiuping Li, Xingrong Chen\*, Yidan Zhu

College of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan Hubei  
Email: liqiuping1996@163.com, <sup>†</sup>chenxingrong2008@163.com

Received: Jul. 18<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 4<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 11<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Global warming and carbon dioxide reduction are important issues of concern to all countries. It is an important task to comprehensively study the factors affecting carbon emissions and effectively reduce carbon emissions. This paper collects relevant data from 30 provinces and cities in China from 2005 to 2017, constructs a GAMLSS model for non-parametric regression analysis, and explores the impact of population size, economic level, urbanization level, and energy intensity on carbon dioxide emissions. The analysis results show that all factors have a linear positive effect on carbon dioxide emissions in the long run, and that the population size, economic level, and urbanization level have an inverted "U"-shaped non-linear impact mode on carbon dioxide emissions within a certain range. Based on the conclusions of the study, combined with China's national conditions, this paper puts forward some suggestions on carbon dioxide emission reduction.

## Keywords

Carbon Dioxide Emissions, GAMLSS Model, Non-Parametric Regression

---

# 基于GAMLSS模型的二氧化碳排放驱动因素分析

李秋萍, 陈兴荣\*, 朱懿丹

中国地质大学(武汉)数学与物理学院, 湖北 武汉  
Email: liqiuping1996@163.com, <sup>†</sup>chenxingrong2008@163.com

收稿日期: 2020年7月18日; 录用日期: 2020年8月4日; 发布日期: 2020年8月11日

---

\*通讯作者。

## 摘要

全球变暖与二氧化碳减排是各国关注的重要议题。综合研究碳排放影响因素,有效减少碳排放是亟待解决的重要任务。本文收集了我国2005~2017年30个省市的相关数据,构建GAMLSS模型进行非参数回归分析,探讨人口规模、经济水平、城市化水平和能源强度对二氧化碳排放的影响机制。分析结果显示,各因素从长期来看对二氧化碳排放具有线性正向效应,且人口规模、经济水平和城市化水平在一定范围内对二氧化碳排放呈现倒“U”型的非线性影响模式。基于研究结论,结合我国国情提出了关于二氧化碳减排的一些建议。

## 关键词

二氧化碳排放, GAMLSS模型, 非参数回归

Copyright © 2020 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

一直以来,全球变暖都是引起各国人民关注的热门问题,它与所有生物的生存发展关系紧密。中国既是世界第二大经济体,也是人口众多、工业化程度高、对煤炭依存度高的发展中国家,面临着巨大的减排压力。准确分析二氧化碳排放的驱动因素及其影响特征可以为我国政府在联合国气候变化框架公约(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)谈判中予以数据的支持,另一方面对制定碳税政策、执行减排任务、建立碳交易市场以及进行碳贸易具有重要意义。

近年来,国内外许多学者对于二氧化碳排放的影响因素展开研究。对于经济和二氧化碳排放的关系,大部分研究基于环境库茨涅兹曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC) [1]的假设展开,假设表示二氧化碳排放量与人均收入呈倒“U”型关系。部分学者使用分解分析方法,如对数平均迪氏指数(Logarithmic Mean Divisa Index, LMDI)法[2],通过恒等式将二氧化碳排放指标分解为几个影响因素的指标并评估它们的贡献[3] [4] [5]。部分学者基于可拓展的随机环境影响评估模型(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology, STIRPAT) [6]进行回归分析[7] [8]。部分学者使用广义可加模型(Generalized Additive Models, GAM) [9]分析二氧化碳排放的驱动因素及其影响特征[10]。分解分析法着重于分析影响因素的贡献度,忽略了影响因素的作用机制。GAM模型等回归模型通常将收集的碳排放数据假设为服从正态分布,当真实数据与正态分布差异显著时,这一假设会影响结果的准确性。

本文收集中国各省市2005~2017年的数据,通过基于位置、尺度、形状的广义可加模型(Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape, GAMLSS) [11]分析二氧化碳排放的影响因素及其影响特征,GAMLSS模型在GAM模型的基础上放宽了对响应变量的分布假设,并对各个分布参数构建函数。最后根据实证分析结果提出了相关建议。

## 2. 数据来源与介绍

### 2.1. 数据来源

本文选取由2005~2017年全国30个省市(西藏除外)的数据构成的面板数据作为研究对象,数据全部

来源于《中国统计年鉴》(2006~2018)和《中国能源统计年鉴》(2006~2018)。由于我国没有直接公布各个省市的二氧化碳排放数据,多数文献中都是通过我国公布的其它数据根据一定的方法计算二氧化碳排放量。目前计算二氧化碳排放量的方法有很多,本文总结了《联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)国家温室气体清单指南》及《省级温室气体清单编制指南(试行)》中的计算方法,选取煤炭、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气六种能源,根据各种能源燃烧的热值计算二氧化碳排放量。经检验,由这种方法计算得出的各省二氧化碳排放量总和与全国能源燃烧产生的二氧化碳排放量大致相等。

## 2.2. 变量的选取

IPAT 等式[12]在环境问题的研究中应用广泛,等式表示如下:

$$I = P \cdot A \cdot T \quad (1)$$

其中  $I$  代表环境污染水平,  $P$  代表人口数,  $A$  和  $T$  代表经济条件和技术条件。STIRPAT 模型作为 IPAT 等式的扩展,用于更全面地分析环境污染的影响因素,模型表示如下:

$$I_t = aP_t^b A_t^c T_t^d \xi_t \quad (2)$$

其中  $I$ 、 $P$ 、 $A$  和  $T$  与式(1)中的意义相同,  $a$  代表常数项,  $b$ 、 $c$  和  $d$  代表弹性系数,下标  $t$  代表时间,  $\xi_t$  代表随机扰动项。本文总结了相关文献,在 STIRPAT 模型的基础上将影响二氧化碳排放量的因素分为五个部分:人口数、城市化水平、经济水平、能源强度和能源结构。其中人口数由各省市历年年末总人口数表示,城市化水平由各省市历年年末城市人口比重表示,经济水平由各省市的人均可支配收入表示,能源强度由各省市历年能源消费总量(折算成标准煤)与地区生产总值之比表示,能源结构由各省市历年天然气消费量占能源消费总量(均折算成标准煤)的比重表示。各变量的描述性统计指标如表 1 所示。

Table 1. Descriptive statistics for each variable

表 1. 各变量的描述性统计指标

变量	单位	均值	标准差	极小值	极大值
CO <sub>2</sub>	万吨	28,308.01	20,359.60	1074.87	101,434.20
TPOP	万人	4450.36	2670.59	543.00	11,169.00
URB	百分比	52.95	13.96	26.87	89.60
INC	元	15442.77	9269.81	3562.83	58,988.00
EI	吨标准煤/万元	1.06	0.60	0.25	4.18
ES	百分比	0.59	0.68	0.00	4.06

注: CO<sub>2</sub>、TPOP、URB、INC、EI 和 ES 分别表示二氧化碳排放量、人口总数、城市化水平、人均可支配收入、能源强度和能源结构,下同。

## 3. 研究方法

### 3.1. GAMLSS 模型

GAMLSS 模型是一种半参数回归模型,参数性体现在需要对响应变量作参数化分布的假设,非参数性体现在模型中解释变量的函数可以涉及非参数平滑函数,非参数平滑函数不预先设定函数关系,各个解释变量的非线性影响结果完全取决于样本数据。它克服了 GAM 模型和广义线性模型(Generalized Linear Models, GLM)的一些局限性。

GAMLSS 模型假设相互独立的观测变量  $y_i (i=1,2,\dots,n)$  的概率(密度)函数为  $f(y_i|\boldsymbol{\theta}^i)$ , 其中条件为分布参数向量  $\boldsymbol{\theta}^i = (\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}) = (\mu_i, \sigma_i, \nu_i, \tau_i)$ , 每个分布参数都可以作为解释变量的函数。通常将  $\mu_i$  和  $\sigma_i$  作为位置参数和尺度参数, 其余参数作为形状参数, 如偏度和峰度等。分布参数向量可以推广到包含四个以上的参数, 也可以是总体分布的参数。令  $g(\cdot)$  为连接解释变量和分布参数的单调连接函数, 函数关系可以表示如下:

$$g_k(\boldsymbol{\theta}_k) = \boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{X}_k \boldsymbol{\beta}_k + \sum_{j=1}^{J_k} \mathbf{Z}_{jk} \boldsymbol{\gamma}_{jk}, k=1,2,3,4 \quad (3)$$

其中  $\boldsymbol{\theta}_k, \boldsymbol{\eta}_k$  是  $n$  维向量,  $\boldsymbol{\beta}_k^T = (\beta_{1k}, \beta_{2k}, \dots, \beta_{J_k k})$  是  $J'_k$  维回归系数向量,  $\mathbf{X}_k$  是已知的  $n \times J'_k$  阶固定设计矩阵,  $\mathbf{Z}_{jk}$  是已知的  $n \times q_{jk}$  阶固定设计矩阵,  $\boldsymbol{\gamma}_{jk}$  是  $q_{jk}$  维随机效应系数向量。在实际问题中, 通常不需要对所有分布参数构建解释变量的函数, 且 GAMLSS 模型可以推广到多种形式, 如半参数可加形式、非线性参数形式等。GAMLSS 模型的半参数可加形式, 表示如下:

$$g_k(\boldsymbol{\theta}_k) = \boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{X}_k \boldsymbol{\beta}_k + \sum_{j=1}^{J_k} h_{jk}(\mathbf{x}_{jk}), k=1,2,3,4 \quad (4)$$

其中  $\mathbf{x}_{jk}$  是  $n$  维解释变量,  $h_{jk}(\cdot)$  是未知的非参数函数。

### 3.2. 指数高斯分布

假设  $Y$  服从指数高斯分布, 其概率密度函数表示如下:

$$f_Y(y|\mu, \sigma, \nu) = \frac{1}{\nu} \exp\left(\frac{\mu - y}{\nu} + \frac{\sigma^2}{2\nu^2}\right) \Phi\left(\frac{y - \mu}{\sigma} - \frac{\sigma}{\nu}\right) \quad (5)$$

其中  $-\infty < y < \infty, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0, \nu > 0$ ,  $\Phi$  是标准正态分布的累积分布函数。指数高斯分布可以看作指数分布和标准正态分布的结合, 即  $Y = Y_1 + Y_2$ ,  $Y_1 \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,  $Y_2 \sim E(\nu)$ ,  $Y_1$  和  $Y_2$  相互独立。 $\mu$  代表正态成分的均值,  $\sigma$  代表正态成分的标准差,  $\nu$  代表指数成分的均值和标准差,  $\nu$  在指数高斯分布中是反映偏度的形状参数。构建指数高斯分布下的 GAMLSS 模型可以弥补响应变量服从标准正态分布这一假设所产生的误差。

### 3.3. 模型构建

为了准确分析各个驱动因素的非线性影响特征, 本文构建指数高斯分布下的半参数形式的 GAMLSS 模型。为了避免异方差性问题以及各变量之间数量级相差过大导致的分析结果不准确, 本文在实验中对所有样本数据进行了自然对数变换。构建的模型表示如下:

$$\begin{aligned} \text{LCO}_{2i} &\sim \beta_1 \text{LTPOP}_i + \beta_2 \text{LURB}_i + \beta_3 \text{LINC}_i + \beta_4 \text{LEI}_i + \beta_5 \text{LES}_i \\ &+ f_1(\text{LTPOP}_i) + f_2(\text{LURB}_i) + f_3(\text{LINC}_i) + f_4(\text{LEI}_i) + f_5(\text{LES}_i) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mu_i = \mathbf{X}_{\mu_i} \boldsymbol{\beta}_{\mu} + \sum_{j=1}^{J_{\mu}} f_{j\mu}(x_{j\mu_i}) \quad (7)$$

$$\ln \sigma_i = \mathbf{X}_{\sigma_i} \boldsymbol{\beta}_{\sigma} + \sum_{j=1}^{J_{\sigma}} f_{j\sigma}(x_{j\sigma_i}) \quad (8)$$

$$\ln \nu_i = \mathbf{X}_{\nu_i} \boldsymbol{\beta}_{\nu} + \sum_{j=1}^{J_{\nu}} f_{j\nu}(x_{j\nu_i}) \quad (9)$$

$\text{LCO}_2$ 、 $\text{LTPOP}$ 、 $\text{LURB}$ 、 $\text{LINC}$ 、 $\text{LEI}$  和  $\text{LES}$  在本文中分别表示对数变换后的二氧化碳排放量、人口

数、城市化水平、人均可支配收入、能源强度和能源结构。式(6)表示二氧化碳排放量的变化主要是各个解释变量线性效应和非线性效应共同作用的结果,式(7)、式(8)、和式(9)表示在指数高斯分布假设下二氧化碳排放量的各个分布参数对应的回归方程。

## 4. 实验结果

### 4.1. 数据预分析和检验

#### 4.1.1. 正态性检验

首先检验响应变量是否满足标准正态分布的假设。使用统计量 Shapiro-Wilk 对二氧化碳排放量的数据进行正态性检验,1%的显著性水平下拒绝了服从正态分布的原假设。因此二氧化碳排放量并不服从标准的正态分布。图 1 是对数变换后的二氧化碳排放量的频率分布直方图,图中的曲线是标准正态分布曲线。指数高斯分布中的形状参数  $\nu$  可以反映偏度情况,从响应变量的频率直方图可以看出,构建指数高斯分布下的 GAMLSS 模型是合理的。

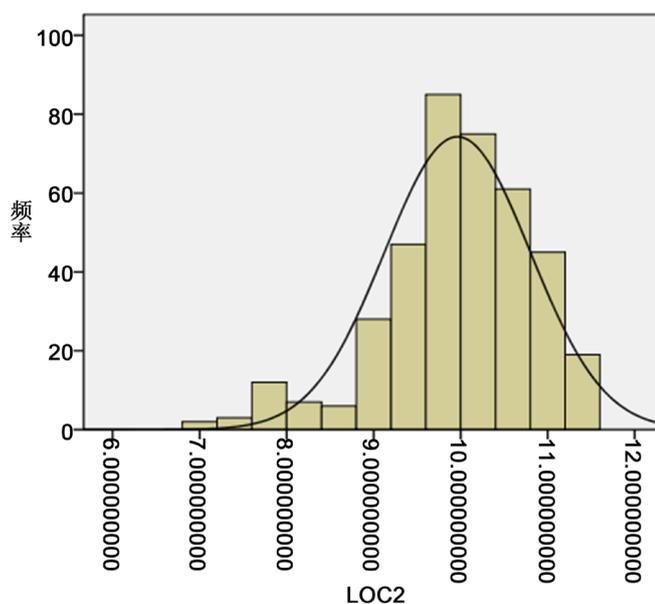


Figure 1. LCO<sub>2</sub> frequency distribution histogram  
图 1. LCO<sub>2</sub> 的频率分布直方图

#### 4.1.2. 单位根检验与平稳性检验

在对面板数据建立回归模型之前需要先进行单位根检验与协整性检验以避免伪回归现象。首先对各变量进行单位根检验。本文使用 Fisher-pp 和 IPS 两种面板数据单位根检验方法进行单位根检验,检验模式为仅含有截距项的检验以及包含截距项和时间趋势项的检验,结果如表 2 所示。

其中所有检验方法的原假设均是序列中含有单位根。从表中结果可以看到,除了能源结构外,每一个变量对应的序列都是不平稳序列,而它们经过一阶差分后的序列都是平稳序列。对能源结构这一变量予以剔除后,剩下的变量满足一阶单整,符合协整性检验的条件。

本文使用 Pedroni、Kao 和 Westerlund 三种方法检验二氧化碳排放量与解释变量之间的协整性。原假设为变量之间没有协整关系,所得结果如表 3 所示,二氧化碳排放量与各个解释变量之间均存在协整关系,即具有长期的均衡关系,因此可以进一步建立回归模型。

**Table 2.** Unit root test results  
**表 2.** 单位根检验结果

		Fisher-pp 检验统计量		IPS 检验统计量	
		仅含截距项	含截距项和时间趋势项	仅含截距项	含截距项和时间趋势项
水平值	LCO <sub>2</sub>	41.11	83.40**	2.82	-0.60
	LTPOP	225.68***	41.12	-6.49***	-0.26
	LURB	64.01	134.95***	2.35	-0.73
	LINC	168.85***	75.25*	-1.86**	0.21
	LEI	23.15	20.19	4.47	4.03
一阶差分值	LES	368.23***	395.20***	-6.28***	-4.81***
	LCO <sub>2</sub>	413.78***	467.40***	-12.33***	-11.61***
	LTPOP	134.71***	415.09***	-5.26***	-10.45***
	LURB	356.87***	340.35***	-8.07***	-5.42***
	LINC	229.94***	248.42***	-8.36***	-7.01***
	LEI	201.96***	242.29***	-6.09***	-5.87***
	LES	481.11***	419.97***	-11.80***	-9.22***

注：\*\*\*、\*\*、\*分别表示在 1%、5%、10%水平显著，下同。

**Table 3.** Co-integration test results  
**表 3.** 协整性检验结果

	LTPOP	LURB	LINC	LEI
Pedroni 检验统计量	-1.32*	-2.36***	-5.47***	0.29
Kao 检验统计量	-1.78**	1.43*	3.02***	2.21**
Westerlund 检验统计量	1.38*	3.89***	-0.66	5.34***

## 4.2. 模型估计

根据单位根检验与协整性检验的结果，剔除能源结构这一变量，模型估计结果表示如下， $f_i(\cdot)(i=1,2,3,4)$ 为三次样条平滑函数：

$$\begin{aligned} \mu = & -11.66 + 1.23\text{LTPOP} + 0.19\text{LURB} + 1.14\text{LINC} + 1.42\text{LEI} \\ & + f_1(\text{LTPOP}) + f_2(\text{LURB}) + f_3(\text{LINC}) + f_4(\text{LEI}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\log(\sigma) = -1.69 \quad (11)$$

$$\log(\nu) = -1.62 \quad (12)$$

在指数高斯分布中，响应变量的均值为  $\mu$  与  $\nu$  之和，由于  $\nu$  的估计结果中仅含有截距项，可通过参数  $\mu$  的函数分析各个解释变量的影响特征。

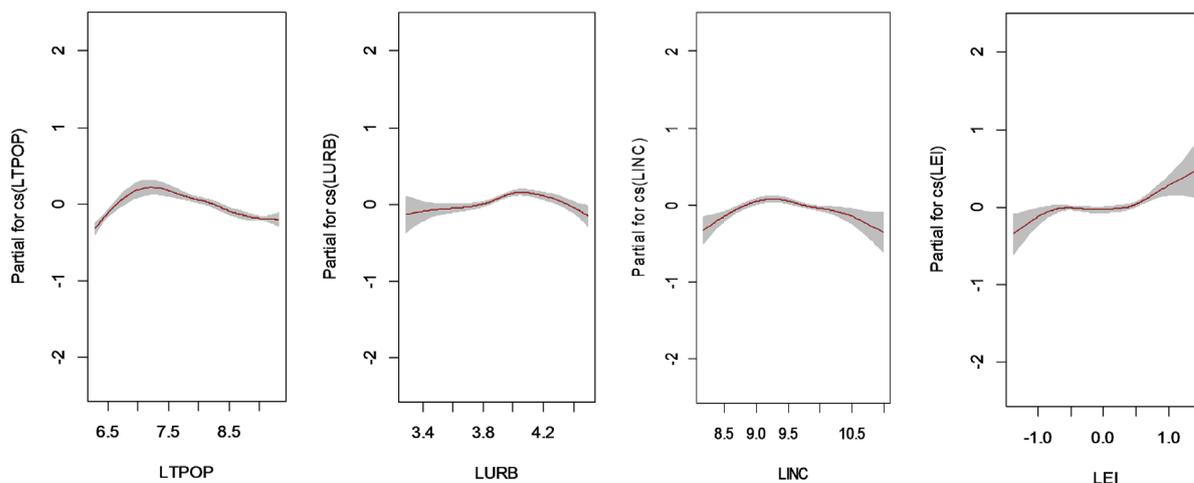
函数的线性部分可以看作是每一个解释变量对响应变量稳定的长期影响。表 4 为线性部分的估计结果。

**Table 4.** Linear part estimation results in GAMLSS model  
**表 4.** GAMLSS 模型中线性部分估计结果

	$\mu$ (恒等连接)			$\sigma$ (对数连接)			$\nu$ (对数连接)		
	估计值	标准误	P 值	估计值	标准误	P 值	估计值	标准误	P 值
截距项	-11.66	0.44	0.0000	-1.69	0.10	0.0000	-0.62	0.13	0.0000
LTPOP	1.23	0.02	0.0000						
LURB	0.19	0.09	0.0306						
LINC	1.14	0.05	0.0000						
LEI	1.42	0.05	0.0000						

在线性估计结果中, 人口增加引起二氧化碳排放量增加, 且人口因素对二氧化碳排放影响的贡献程度较大。这与 Hoesly 等[13]的研究结果一致。随着人口规模的扩大, 对包括能源供应在内的各种资源需求增加, 直接导致更多的碳排放。能源强度对二氧化碳排放的正向影响程度最大。能源强度降低表示能源利用效率升高, 技术水平的进步与能源利用效率的提高可以有效地减少二氧化碳的排放, Kim [14]等在实证分析中验证了这一结论。经济水平的提高同样是使二氧化碳排放量增加的主要因素之一, Zhang [15]与 Li [16]等也验证了这样的结果。经济的发展伴随着大量的能源消耗, 而煤炭在我国能源结构中占主要比重, 因此二氧化碳排放也随之大幅增加。另外, 由于工业占据我国经济结构的主导地位, 同样会消耗大量化石燃料。城市化水平对二氧化碳的排放具有程度较小的正向效应。城市化的发展伴随着城市人口的增加和城市区域的扩大, 由此导致工业、建筑业的发展以及交通需求的增加, 加剧了二氧化碳的排放。刘希雅等[17]也在研究中表示由城市化过程造成的碳排放增长速度超过了城市化的发展速度。

各个驱动因素的非参数贡献是随着解释变量的变化而变化的。将各解释变量经对数变换后的数据按升序排列作为横坐标, 对应的非参数贡献为纵坐标作出函数图像, 结果如图 2 所示。



**Figure 2.** Nonlinear effects in the GAMLSS model  
**图 2.** GAMLSS 模型中的非线性影响

其中能源强度的非参数贡献呈不同速度的增加趋势。对于人口总数、城市化水平和人均可支配收入, 在初始阶段对二氧化碳排放具有正向效应, 到一定水平之后, 对二氧化碳排放具有负向效应, 非参数函数图形在一定范围内呈现倒“U”型模式。

非线性部分的结果可以看作线性结果无法反映的一些短期波动,这种波动可能是一些外界的不确定因素造成的。人口总数在一定范围内对二氧化碳的影响由促进变成抑制,可以认为是由于人口规模的扩大,促进了技术改革,从而对二氧化碳排放产生程度较小的负向作用,李国志等[18]在研究中对这一现象作出了解释。在城市化水平的初始发展阶段,随着城市区域的扩大以及制造业的发展,对二氧化碳排放具有正向影响,而到城市化水平发展到一定程度,环境质量会因为相关政策规定、技术进步以及产业结构的优化得到改善,各部门的生产模式趋于清洁生产,生态现代化理论和城市环境转变理论对城市化水平的影响机制作出了解释[19],张腾飞等[20]也验证了这一结论。人均收入对二氧化碳排放的非线性影响与环境 EKC 假设的内容大体一致。经济发展到一定水平后,人们意识到环境质量恶化带来的严重后果,加上经济结构的调整以及可替代能源的发展,二氧化碳排放得到抑制。

### 4.3. 模型评价

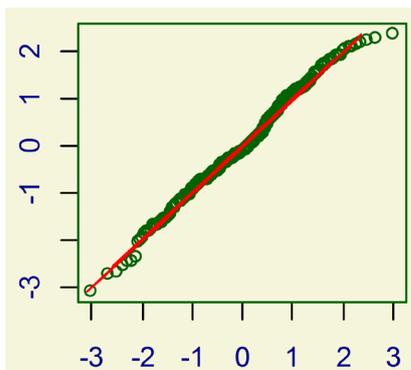
为了评估模型的可靠性,本文对相同的样本数据建立线性回归模型。将线性回归模型与本文构建的 GAMLSS 模型进行对比,结果由表 5 所示。

**Table 5.** Comparison of estimation results of the two models  
**表 5.** 两种模型估计结果对比

	截距	LTPOP	LURB	LINC	LEI	R <sup>2</sup>	AIC	BIC
线性回归模型	-11.88***	1.16***	0.38***	1.16***	1.57***	0.85	237.16	260.96
GAMLSS 模型	-11.66***	1.23***	0.19**	1.14***	1.42***	0.90	95.62	170.97

其中 R<sup>2</sup> 为决定系数, AIC 表示赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC), BIC 表示贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)。从表中可以看出,两种模型中解释变量的回归系数与截距项的估计结果大体一致,因此 GAMLSS 的线性估计结果可以较为准确地反映变量之间的长期关系。通过比较相关指标可以看出 GAMLSS 模型的拟合效果更好。

模型的残差 QQ 图表示如图 3 所示,横坐标代表理论分位数,纵坐标代表样本分位数。与直线近似表明模型的拟合效果较好。



**Figure 3.** Model residual QQ plot  
**图 3.** 模型残差 QQ 图

## 5. 结论和政策建议

本文选取 2005~2017 年全国 30 个省市的数据分析二氧化碳排放的驱动因素及其影响特征,构建指数高斯分布下的 GAMLSS 模型,通过非参数方法研究解释变量的非线性影响。指数高斯分布可以弥补当响

应变量不满足标准高斯分布假设时产生的误差, 非参数方法不预设函数关系, 得到的结果更加准确。在三个分布参数的估计结果中, 由于  $\sigma$  和  $\nu$  的函数中仅含有截距项, 本文通过  $\mu$  与解释变量间的函数关系分析各个驱动因素对二氧化碳排放的影响特征。结果表明, 人口规模、人均收入和能源强度对二氧化碳排放具有程度较大的线性正向效应, 城市化水平对二氧化碳排放具有程度较小的线性正向效应。另外, 人口规模、人均收入与城市化水平在一定范围内对二氧化碳排放具有倒“U”型的非线性影响模式。基于上述结论, 提出以下建议:

(1) 提高能源利用效率。从实验结果可以看出, 降低能源强度是减排的最大驱动因素。各部门和机构应引进先进的节能技术, 扩大研究与开发的投资规模, 培养高水平的技术人员。政府应出台相应的优惠政策, 加大研发力度, 鼓励高科技企业的发展, 通过完善相关法规制度以保证单位产值的能耗降低。

(2) 发展低碳经济。尽管人均收入对二氧化碳排放在一定范围内具有先促进后抑制的作用, 从长期来看, 经济水平仍是促使二氧化碳排放量增加的主要因素之一。政府应大力促进经济结构的改善, 加强培养低碳产业, 如电子商务、互联网与信息技术产业等, 要求各部门从业人员重视绿色发展, 提高经济质量。

(3) 提高居民环保意识。中国人口众多, 消费市场巨大。大量人口和城市化进程都将导致对服务和商品的巨大需求。公众应提高环保意识, 购买节能和低碳商品, 政府应注重提高人口素质, 鼓励消费者养成绿色生活方式。

## 参考文献

- [1] Panayotou, T. (1993) Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development. International Labour Organization, Geneva.
- [2] Ang, B.W. and Choi, K.H. (1997) Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method. *Energy Journal*, **18**, 59-73. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol18-No3-3>
- [3] Mousavi, B., Lopez, N.S., Biona, J.B., et al. (2017) Driving Forces of Iran's CO<sub>2</sub> Emissions from Energy Consumption: An LMDI Decomposition Approach. *Applied Energy*, **206**, 804-814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.199>
- [4] Yang, J., Cai, W., Ma, M., et al. (2020) Driving Forces of China's CO<sub>2</sub> Emissions from Energy Consumption Based on Kaya-LMDI Methods. *Science of the Total Environment*, **711**, Article ID: 134569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134569>
- [5] Wen, L. and Li, Z. (2020) Provincial-Level Industrial CO<sub>2</sub> Emission Drivers and Emission Reduction Strategies in China: Combining Two-Layer LMDI Method with Spectral Clustering. *Science of the Total Environment*, **700**, Article ID: 134374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134374>
- [6] Dietz, T. and Rosa, E.A. (1997) Effects of Population and Affluence on CO<sub>2</sub> Emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **94**, 175-179. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.1.175>
- [7] Zhang, H., Zhang, Z. and Sheng, K. (2018) Effects of Global Value Chain Position on the Carbon Emissions of Manufacturing Industry in China: An Empirical Study Based on the STIRPAT Model. *Meteorological and Environmental Research*, **9**, 52-57.
- [8] 渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 10-15.
- [9] Hastie, T. and Tibshirani, R. (1986) Generalized Additive Models. *Statistical Science*, **1**, 297-318. <https://doi.org/10.1214/ss/1177013604>
- [10] Wen, L. and Shao, H. (2019) Influencing Factors of the Carbon Dioxide Emissions in China's Commercial Department: A Non-Parametric Additive Regression Model. *Science of the Total Environment*, **668**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.412>
- [11] Rigby, R.A. and Stasinopoulos, D. (2005) Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape. *Journal of The Royal Statistical Society Series C Applied Statistics*, **54**, 507-554. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2005.00510.x>
- [12] Ehrlich, P.R. and Holdren, J.P. (1971) Impact of Population Growth. *Science*, **171**, 1212-1217. <https://doi.org/10.1126/science.171.3977.1212>
- [13] Hoesly, R., Matthews, H.S., Hendrickson, C., et al. (2015) Energy and Emissions from U.S. Population Shifts and Implications for Regional GHG Mitigation Planning. *Environmental Science & Technology*, **49**, 12670-12678. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02820>
- [14] Kim, K. and Kim, Y. (2012) International Comparison of Industrial CO<sub>2</sub> Emission Trends and the Energy Efficiency

Paradox Utilizing Production-Based Decomposition. *Energy Economics*, **34**, 1724-1741.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.02.009>

- [15] Zhang, Y., Zhang, Q. and Pan, B. (2019) Impact of Affluence and Fossil Energy on China Carbon Emissions Using STIRPAT Model. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 18814-18824.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04950-4>
- [16] Li, S. and Wang, S. (2019) Examining the Effects of Socioeconomic Development on China's Carbon Productivity: A Panel Data Analysis. *Science of the Total Environment*, **659**, 681-690. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.409>
- [17] 刘希雅, 王宇飞, 宋祺佼, 等. 城镇化过程中的碳排放来源[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 61-66.
- [18] 李国志, 李宗植. 人口、经济和技术对二氧化碳排放的影响分析——基于动态面板模型[J]. 人口研究, 2010, 34(3): 32-39.
- [19] Poumanyong, P. and Kaneko, S. (2010) Does Urbanization Lead to Less Energy Use and Lower CO<sub>2</sub> Emissions? A Cross-Country Analysis. *Ecological Economics*, **70**, 434-444. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.029>
- [20] 张腾飞, 杨俊, 盛鹏飞. 城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 47-57.