

# 基于空间计量分析的 广东省经济发展水平区域差异探究\*

李航飞

(韶关学院旅游与地理学院, 广东 韶关 512005)

**摘要:** 以广东省21个地市作为基本研究对象, 以人均GDP作为衡量经济发展水平高低的指标, 运用灰色预测方法、空间自相关分析及空间回归分析等方法探讨了广东省2000-2012及2018年经济发展水平区域差异的时空演化特征。结果表明, 广东省各地市的经济发展水平: ①在空间上存在明显的全局空间自相关性(依赖性)特征, 经济发展水平高和低的地区分别在空间上集聚; ②空间格局相对稳定, 空间差异变化不大, 整体空间差异先缩小后增大, 珠三角地区形成了较稳定的高值(HH)集聚区域, 而粤东、粤西地区则形成了稳定的低值(LL)集聚区域; ③局域空间自相关性较弱, 在时空演变过程中形成了稳定的HH显著区域——东莞, LL显著区域: 梅州、揭阳、潮州; ④预测结果显示, 广东省各地市经济发展水平的空间格局较为稳定, 但空间差异将进一步增大; ⑤影响经济发展水平区域差异的主要因素有经济结构、城市经济发展水平及劳动力资源的投入。

**关键词:** 区域差异; 空间自相关; 空间回归分析; 灰色预测; 广东省

**中图分类号:** F127 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)04-0164-07

## Region Difference of Economic Development in Guangdong Province Based on Spatial Statistical Analysis

Li Hangfei

(College of Tourism & Geography, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China)

**Abstract:** This paper takes 21 regions in Guangdong province as research object, and uses the index of per capita GDP to analyse spatial-temporal evolution of the economic development during 2000-2012 and 2018 in Guangdong Province by means of grey prediction, spatial autocorrelation and spatial regression. The characteristic of global spatial autocorrelation of the economic development level of different regions in Guangdong is obvious and the region difference of economic development in Guangdong is relatively small. The spatial pattern of region economic development in Guangdong is stable and the spatial difference is relatively small. The local spatial autocorrelation of the economic development level of different regions in Guangdong is not obvious and different gather centers have been formed. The spatial difference of economic development is influenced mainly by economic structure, urbanization economic development level and human resources.

**Key words:** region difference; spatial autocorrelation; spatial regression; grey prediction; Guangdong Province

\* 收稿日期: 2014-11-12

**基金项目:** 广东省高校优秀青年创新人才培养计划资助项目(2013WYM0075); 国家自然科学基金资助项目(41301161); 广东省哲学社会科学"十二五"规划资助项目(GD12XGL26), 韶关市哲学社会科学规划项目(G2014014); 广东省本科高校教学质量与教改工程资助项目(201493)

**作者简介:** 李航飞(1980年生), 男; 研究方向: 旅游地理和区域经济; E-mail: lihangfei1980@126.com

区域经济差异一直以来是学术界研究的热点问题, 地理学、经济学、社会学等学科的专家学者对区域经济差异都有深入的研究。目前关于区域经济差异的研究主要表现在以下几方面<sup>[1-11]</sup>: 1) 影响区域经济差异的因素, 专家学者们主要从经济基础、区位条件、资源禀赋、政府政策、经济结构、交通条件、市场及城市化等方面探讨区域经济差异的成因; 2) 区域经济差异的研究尺度, 空间研究尺度由3大地带、省域等宏观尺度转向县域、乡镇单元等微观尺度的研究, 时间研究尺度基本上没有对未来发展态势进行预测; 3) 区域差异的测度方法, 对区域差异的测度方法主要有标准差、极差、洛仑兹曲线、基尼系数、泰尔系数、变异系数、加权变异系数、广义熵和阿特金森指数等传统的统计分析方法和随着GIS科学发展兴起的空间统计分析方法; 4) 测度区域经济差异的指标, 测度区域经济差异所选用的指标主要有GDP、人均GDP、人均农村居民纯收入、人·地均GDP等等。

广东省是我国的经济大省、经济强省, 多年来广东省的地区生产总值都稳居全国第一, 广东省经济快速发展的同时, 不同地区之间发展差异也拉大。文章以广东省21个地市作为基本研究对象, 以人均GDP作为衡量经济发展水平高低的指标, 运用灰色预测方法、空间自相关分析及空间回归分析等方法探讨广东省2000-2012年及2018年经济发展水平区域差异的时空演化特征及其成因。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 灰色预测模型

灰色预测模型就是将原始信息数据序列通过一定的数学方法处理后, 将其转化为动态微分方程来描述原系统的内在特征, 建立抽象系统的动态演变预测模型, 关于灰色预测模型的详细理论及建模步骤、计算方法等详见参考文献[12-13]。本文基于2000-2012年广东省各地市人均GDP数据, 采用灰色GM(1, 1)模型, 利用DPS数据处理软件对2018年广东省各地市的人均GDP进行预测。

### 1.2 空间自相关分析法

空间自相关是指一个变量的观测值之间因观测点在空间上邻近而形成的相关性<sup>[14-15]</sup>。根据空间范围的大小, 可分为全局型空间自相关和局域型空间自相关两种, 文章利用全局Moran's  $I$  和局域型Moran's  $I_i$  对广东省经济发展水平进行空间自相关性分析。

#### 1.2.1 全局空间自相关分析 全局空间自相

关<sup>[14-15]</sup>是对属性值在整个区域的空间特征的描述, 其Moran's  $I$  的计算公式如下:

$$I = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中,  $X_i$ 、 $X_j$  为  $i$  市域和  $j$  市域的人均GDP;  $W_{ij}$  为空间权重矩阵, 本文根据邻接性标准构建权重, 两市域如果在空间上相邻, 权重为1; 否则权重为0。根据公式计算出的Moran's  $I$  值介于-1到1之间, 大于0为正相关, 小于0为负相关, 值越大表示空间分布的相关性越强, 空间上有聚集分布的现象, 空间差异也越小; 反之, 值越小代表空间分布相关性越弱, 而当值趋于0时, 代表此时空间分布呈现随机分布的情形, 空间差异也越大。计算出Moran's  $I$  之后, 还需对其结果进行统计检验。广东省各年份区域经济发展水平的Moran's  $I$  值情况, 见表1。

#### 1.2.2 局域空间自相关分析

1) Moran's  $I$  散点图。将变量  $Z$  (人均GDP) 与其空间滞后向量  $Wz$  之间的相关关系, 以散点图的形式加以描述, 则构成Moran's  $I$  散点图, 其可划为4个象限(HH象限、LH象限、LL象限及HL象限), 分别对应了4种空间差异类型(见表2), 高(H)和低(L)是相对于区域经济发展的平均水平而言, “高高”和“低低”表明具有较高的空间正相关, 说明区域的集聚和相似性; “高低”和“低高”则表示存在较强的空间负相关, 表明区域具有异质性<sup>[14-15]</sup>。

2) 局域统计量(LISA)。Local Moran's  $I_i$  是Global Moran's  $I$  的分解形式, 可用来进一步度量区域  $i$  与其周边地区之间的空间差异程度及其显著性。对第  $i$  个区域而言, 该统计量的数学表达式为<sup>[14-15]</sup>:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j \quad (2)$$

式中  $Z_i$ 、 $Z_j$  分别为中心市域  $i$  和与其相邻市域  $j$  的经济发展水平的标准化值。

### 1.3 空间计量回归分析

如广东省经济发展水平差异在空间上有明显的空间依赖性, 则采用空间计量经济回归模型对空间差异的成因进行分析。空间回归模型主要有空间滞后模型(Spatial Lag Model, SLM)和空间误差模型(Spatial Error Model, SEM); 前者主要探讨各变量在一个地区是否有扩散现象, 也就是空间溢出

效应；后者的空间依赖作用存在于扰动误差项之中，其度量了邻接地区关于被解释变量的误差冲击对本地区观察值的影响程度；关于两种模型的理论、选择及应用详见参考文献 [16-18]。

#### 1.4 数据来源

为保证研究的准确性，文章所用原始数据均来自《广东省统计年鉴（2001-2013）》，部分数据通过计算获取。

## 2 广东省经济发展水平区域差异时空演变分析

### 2.1 广东省区域经济发展水平灰色预测分析

根据广东省统计年鉴数据，基于 2000-2012 年各地市人均 GDP，利用灰色预测模型 GM(1,

1)，通过 DPS 数据处理软件分别预测出各地市 2018 年的人均 GDP。

### 2.2 广东省区域经济发展水平空间自相关分析

2.2.1 全局空间自相关分析 根据全局空间自相关的理论及计算公式，以各市域的人均 GDP 为指标，利用 GeoDa 软件计算出广东省 2000-2012 年及 2018 年区域经济发展水平的 Moran's  $I$  值（见表 1）。

由表 1 可知，① 广东省区域经济发展水平的 Moran's  $I$  值都大于 0，并且在 0.02 的显著性水平下都通过显著性检验，说明广东省区域经济发展水平在空间上表现出较强的空间自相关性（依赖性），即经济发展水平高的地市在空间上集聚，经济发展水平低的地市也在空间上集聚的特点。

表 1 全局自相关分析结果<sup>1)</sup>

Table 1 The result of global spatial autocorrelation analysis

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Moran's $I$	0.241 6	0.257 6	0.272 9	0.285 2	0.305 5	0.324 2	0.329 9
$P$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2018
Moran's $I$	0.332 8	0.338 1	0.321 6	0.316 0	0.313 4	0.303 2	0.300 5
$P$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

1) 假设检验使用 999 次重复排列方法， $P$  值用来衡量 Moran's  $I$  值是否能通过显著性检验，以  $\leq 0.05$  为宜。

表 2 广东省区域经济发展水平象限分布

Table 2 The quadrant distribution of economic development level in Guangdong province

象限	特点	2000 年 (2001)	2002 年 (2003-2005)	2006 年	2007 年 (2008-2018)
HH 象限	市域本身和周边市域的平均经济发展水平均较高，二者的空间差异程度较小；中心市域与周边市域经济发展水平呈“凸”字型特征。	广州、深圳、东莞、珠海、中山、佛山、惠州、江门	广州、深圳、东莞、珠海、中山、佛山、惠州	广州、深圳、东莞、珠海、中山、佛山、惠州	广州、深圳、东莞、珠海、中山、佛山、惠州
LH 象限	市域本身经济发展水平较低，周边市域的平均水平较高，二者的空间差异程度较大；中心市域与周边市域经济发展水平呈“V”字型特征。	韶关、清远	韶关、清远、江门	韶关、清远、江门、云浮	韶关、清远、江门、云浮、阳江、肇庆
LL 象限	市域本身和周边市域的平均经济发展水平均较低，二者的空间差异程度较小；中心市域与周边市域经济发展水平呈“凹”字型特征。	湛江、茂名、阳江、肇庆、梅州、河源、汕尾、潮州、揭阳、汕头、肇庆、云浮、阳江	湛江、茂名、梅州、河源、汕尾、潮州、揭阳、汕头、阳江、云浮	湛江、茂名、梅州、河源、汕尾、潮州、揭阳、汕头、肇庆、阳江	湛江、茂名、梅州、河源、汕尾、潮州、揭阳、汕头
HL 象限	市域本身经济发展水平较高，周边市域的平均水平较低，二者的空间差异程度较大；中心市域与周边市域经济发展水平呈“A”字型特征。				

② 广东省区域经济发展水平的 Moran's *I* 值的变化可分为两个阶段，第一阶段为 2000 - 2008 年，Moran's *I* 值由 0.241 6 增加到 0.338 1，根据空间自相关的理论，说明这段时间内，广东省区域经济发展水平的空间集聚趋势越来越明显，经济发展水平整体空间差异越来越小；第二阶段为 2008 年以来，Moran's *I* 值由 0.338 1 降低到 2012 年的 0.303 2，2018 年的预测值为 0.300 5，说明这段时间内广东省区域经济发展水平的空间集聚趋势越来越弱，经济发展水平整体空间差异越来越大。

2.2.2 局域空间自相关分析 全局 Moran's *I* 值是一种总体统计指标，说明的是广东省 21 地市与周

边地市之间经济发展水平空间差异的平均程度，在地市总体空间差异较小的情况下，局部空间差异有可能较大，为了全面反映广东省各地市之间经济发展水平空间差异情况，需进一步采用局域自相关分析法。

1) 广东省区域经济发展水平散点图。根据前述相关理论，利用空间统计分析软件生成了广东省 2000 (2001) 年、2002 (2003 - 2005) 年、2006 年、2007 (2008 - 2018) 年经济发展水平区域差异散点图，各地市在散点图中所处的象限位置见表 2，各地市的空间可视化如图 1。

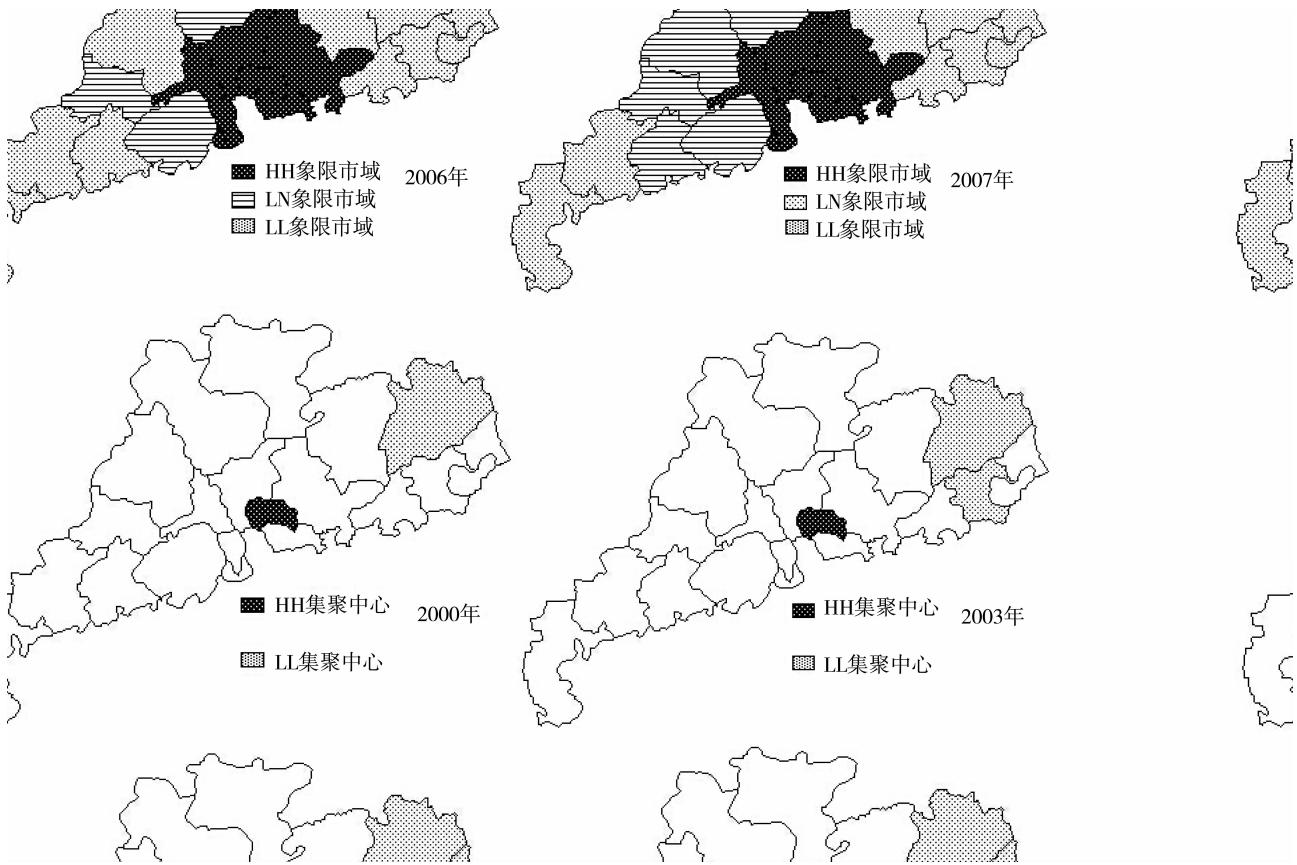


图 1 广东省区域经济发展水平散点图

Fig. 1 The scatter diagram of region economic development level in Guangdong province

从表 2 和图 1 可知，自 2000 年以来：① 广东省区域经济发展水平差异的空间格局经历了两个阶段：第一阶段为空间格局变动阶段，时间为 2000 - 2007 年，此阶段广东省各地市的空间格局发生了三次变化，具体地市的变动情况详见表 2 和图 1；第二阶段为空间格局稳定阶段，时间为 2007 - 2012 年，同时包括预测年份 2018 年；② 广东省大部分地市位于 HH 和 LL 象限，说明区域经济发展

水平有较强的空间自相关性或空间依赖性，与全局自相关得出的结论一致；③ 各个阶段中，象限发生改变的地市仅四个（江门、云浮、肇庆、阳江），珠三角地区的广州、深圳、东莞、珠海、中山、佛山、惠州等经济发展水平高的地市在空间上形成稳定的 HH 集聚区域，粤东地区的河源、梅州、揭阳、潮州、汕头、汕尾等地市及粤西地区的湛江、茂名等地市在空间上形成稳定的 LL 集聚区

域, 其它地市则形成比较稳定的 LH 集聚区域; 根据灰色预测数据, 2018 年广东省各地市经济发展水平的空间象限位置没有发生改变, 进一步说明了广东省各地市经济发展水平差异的空间格局比较稳定, 经过 10 多年的发展, 落后地区的经济发展水平并没有赶上全省平均水平; ④ 需要说明的是, 虽然各地市在不同空间象限的位置基本没有发生改变, 但在具体的象限中, 其空间位置还是发生了一

定的变化。

2) 广东省区域经济发展水平局域统计量 (LISA)。利用 GeoDa 软件计算出各市域的局域自相关系数, 局域自相关系数在 0.05 的显著性水平下能通过检验, 在统计上有意义的市域的空间分布见图 2, 图 2 称为 LISA 聚集图或称为 Local Moran's  $I$  显著性水平图, 反映的是各市域局域象限分布是否显著。

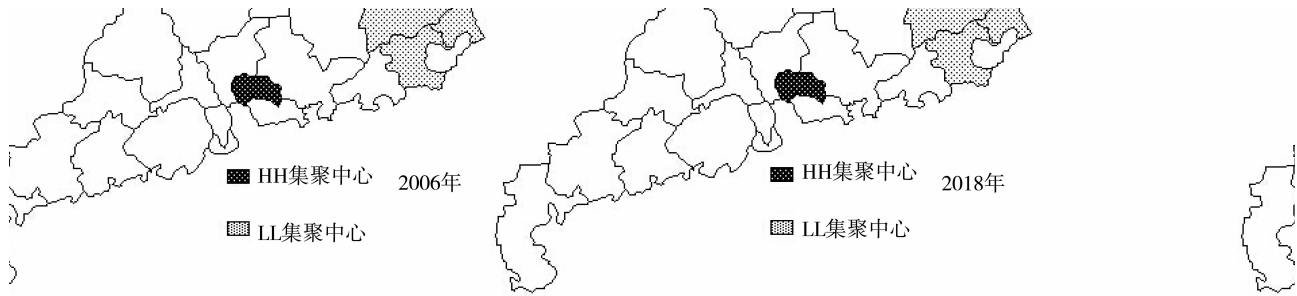


图 2 广东省区域经济发展水平 LISA 集聚图

Fig. 2 The LISA cluster map of region economic development level in Guangdong province

由图 1 和 2 可知, ① 虽然广东省区域经济发展水平在整体上表现较强的空间自相关性 (依赖性), 但真正能通过局域自相关系数显著性 (0.05 的显著性水平) 检验的地市则很少 (图 2), 这说明广东省区域经济发展水平的局域自相关性还比较弱, 相邻地市之间的相互联系和合作还有待加强; ② 广东省区域经济发展水平的空间差异形成的空间集聚中心变化不大, 东莞市作为“凸”字型 (HH) 集聚中心的地位没有发生改变, “凹”字型 (LL) 集聚中心由 2000 (2001、2002) 年的梅州演变为 2003 (2004、2005) 年的梅州、揭阳两市, 到 2006 年潮州加入, 至此, 广东省稳定的区域集

聚中心 (热点或冷点地市) 形成, 包括预测的 2018 年空间格局状况也是如此; ③ 2000 年、2003 年、2006 年及 2018 年的 LISA 聚集图中都没有出现“A”字型 (HL) 和“V”字型 (LH) 集聚中心, 进一步说明了广东省区域经济发展水平的整体空间差异性较小, 并且空间格局相对稳定。

### 2.3 广东省区域经济发展差异空间回归分析

前文分析可知, 广东省区域经济发展水平空间差异具有明显的空间自相关性, 为了探讨其成因, 文章以 2012 年各地市的人均 GDP ( $Y$ ) 为因变量, 经过对所选自变量进行相关分析后, 删除部分相关系数较大的自变量, 最终以各地市的劳动力投入

( $X_1$ , 用从业人员数量表示, 单位为万人)、区域政策 ( $X_2$ , 以人均固定资产投资表示, 投资额的地域分布, 在一定程度上反映了决策者对区域经济发展的意图或目标<sup>[19]</sup>)、城市经济发展水平 ( $X_3$ , 用城镇人口占常住人口的比重表示)、经济结构 ( $X_4$ , 第三产业所占 GDP 比重来表示) 为自变量进行空间回归分析。

根据空间计量回归分析的理论<sup>[16-18]</sup>, 文章最终选取空间滞后模型来探讨广东省区域经济发展水平空间差异的成因, 回归分析结果见表3。

表3 SLM 估计结果  
Table 3 Estimation results of SLM

变量	系数	标准差	Z 值	P 值
$X_1$	77.597 8	0.124 0	625.637 8	0.000 0
$X_2$	1.716 1	6.438 3	0.266 5	0.789 8
$X_3$	401.776 4	0.007 4	54 159.480 0	0.000 0
$X_4$	281.242 7	0.003 2	86 733.510 0	0.000 0

从表3可知: 变量  $X_2$  (区域政策) 通不过显著性检验, 说明政策对广东省区域经济发展的影响不明显; 变量  $X_1$  (劳动力投入)、 $X_3$  (城市经济发展水平)、 $X_4$  (经济结构) 系数为正且较大, 并通过显著性检验, 说明城市经济发展水平、经济结构及劳动力特别是高素质劳动力的投入对区域经济发展的影响很大。珠三角地区一直是广东省经济发展的核心区域, 经济发展水平明显高于粤东西北地区, 其在从业人员的素质、城市经济发展、产业结构调整等方面的优势是粤东西北地区无法比拟的, 这就使得长期以来广东省区域经济发展过程中, 珠三角地区形成了较稳定的高值集聚区域, 而其它地区则形成了稳定的低值集聚区域。

### 3 结 论

任何事物与其周围事物都存在相关联系, 但与其较近的事物与之联系更紧密, 几乎所有空间数据都具有空间依赖或空间自相关特征<sup>[20]</sup>, 文章通过灰色预测模型、空间自相关分析及空间回归分析等方法对广东省经济发展水平区域差异进行了分析, 在一定程度上能够更好地探讨广东省各地市经济发展水平的空间差异及空间相互作用。研究结果表明, 广东省 21 地市的经济发展水平在空间上存在明显的全局空间自相关性特征, 并且这种空间格局相对稳定, 在珠三角地区形成了较稳定的高值集聚区域, 而粤东、粤西地区则形成了稳定的低值集聚

区域; 广东省 21 地市经济发展水平的局域空间自相关性较弱, 在时空演变过程中形成了稳定的高值显著区域: 东莞, 低值显著区域: 梅州、揭阳、潮州; 未来一段时间, 广东省区域经济发展水平的空间格局虽保持较为稳定的趋势, 但空间差异将进一步增大; 空间回归分析结果表明, 影响广东省经济发展水平区域差异的主要因素有经济结构、城市经济发展水平及劳动力资源的投入等。广东省各地市应根据各自所处的空间位置有针对性的加快经济发展, 粤东西北地区应加快经济结构调整步伐, 建设具有一定竞争力的区域中心城市以带动整个区域经济发展, 同时要加强对人力资本的投入, 提高从业人员的素质; 虽然广东省区域经济发展水平的整体空间差异较小, 但各地市与其周边地市经济发展水平空间差异较大, 表现为局域自相关性较弱, 说明广东各地市与其周边地市的经济整合发展力度有所欠缺, 在以后的发展过程中, 要多注意与周边地市之间相互合作, 达到资源互补、优势互补、共同加快区域经济的发展。

### 参考文献:

- [1] 苏方林, 徐建华, 包惠. 中国省际区域经济发展差异的实证分析[J]. 北方经济, 2004(11): 45-47.
- [2] 管卫华, 林振山, 顾朝林. 中国区域经济发展差异及其原因的多尺度分析[J]. 经济研究, 2006(7): 117-125.
- [3] 吴爱芝, 杨开忠, 李国平. 中国区域经济发展差异变动的研究综述[J]. 经济地理, 2011, 31(5): 705-711.
- [4] 陈芳, 龙志和. 中国县域经济差距的收敛性研究: 基于动态面板数据的 GMM 方法[J]. 中国科技论坛, 2011, 4(4): 140-144.
- [5] 王少剑, 方创琳, 王洋, 等. 广东省区域经济发展差异的方向及影响机制[J]. 地理研究, 2013, 32(12): 2244-2256.
- [6] 孙久文, 姚鹏. 基于空间异质性视角下的中国区域经济发展差异研究[J]. 上海经济研究, 2014(5): 83-92.
- [7] 陈文娣, 黄震方, 蒋卫国, 等. 长江中游经济带区域经济发展差异及其时空演变特征[J]. 热带地理, 2013, 33(3): 324-332.
- [8] 尹来盛, 冯邦彦, 李胜会. 广东省区域发展差异及空间格局演变——兼论 3 种测度方法的比较[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(1): 31-34, 69.
- [9] 李广东, 方创琳. 中国区域经济增长差异研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2013, 32(7): 1102-1112.
- [10] 茹乐峰, 张改素, 丁志伟, 等. 我国西部地区市域经济的时空差异研究[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(2): 54-59, 134.

- [11] 夏雪,韩增林,赵林,等. 省际边缘区区域经济差异的时空格局与形成机理——以鄂豫皖赣为例[J]. 经济地理,2014,34(5):21-27.
- [12] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2002:338-347.
- [13] 高娅娜. 北京市旅游产业灰色预测[J]. 中外企业文化,2014(1):99-100.
- [14] 李航飞. 广东省区域旅游竞争力空间分析[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版,2011,24(2):220-223.
- [15] 李航飞. 福建省县域城镇化发展水平区域差异分析[D]. 福州:福建师范大学,2008.
- [16] 吴玉鸣,李建霞. 中国区域工业全要素生产率的空间计量经济分析[J]. 地理科学,2006,26(4):385-391.
- [17] 李航飞,汤小华,魏文佳. 福建省县域经济差异成因空间统计分析[J]. 杭州师范学院学报:自然科学版,2007,6(4):292-295.
- [18] 柳思维,徐志耀,唐红涛. 公路基础设施对中部地区城镇化贡献的空间计量分析[J]. 经济地理,2011,31(2):237-241.
- [19] 魏也华. 我国基本建设投资区域分布的变化[J]. 地理科学,1994,14(1):22-29.
- [20] 鲁凤. 中国区域经济差异的空间统计分析[D]. 上海:华东师范大学,2004.

(上接第163页)

- [6] 邓茂芝,范绍佳,邓奕,等. 室内空气污染防治研究[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(S1):65-67.
- [7] WU D, TIE X X, LI C C, et al. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(35): 6568-6577.
- [8] TIE X X, WU D, GUY B. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(14): 2375-2377.
- [9] 吴兑. 多种人体舒适度预报公式讨论[J]. 气象科技, 2003,31(6):370-372.
- [10] 吴兑. 新版《环境空气质量标准》热点污染物PM<sub>2.5</sub>监控策略的思考与建议[J]. 环境监测与预警,2012,4(4):1-7.
- [11] 范绍佳,祝薇,王安宇,等. 珠江三角洲地区边界层气象特征研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2005,44(1):99-102.
- [12] FENG Y R, WANG A Y, WU D, et al. The influence of tropical cyclone melor on PM<sub>10</sub> concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta region of China: Numerical Modeling Versus Observational Analysis[J]. Atmospheric Environment, 2007,41(21): 4349-4365.
- [13] 李颖敏,范绍佳,张人文. 2008年秋季珠江三角洲污染气象条件分析[J]. 中国环境科学,2011,31(10): 1585-1591.
- [14] 刘婷,黄兴友,高庆先,等. 不同气象条件下的气溶胶时空分布特征[J]. 环境科学研究,2013,26(2):122-128.
- [15] 张剑鸣,陶俊,张仁健,等. 2008年1月广州大气污染特征及能见度观测研究[J]. 环境科学研究,2008,21(6):161-165.
- [16] 黄义,范绍佳. 珠江三角洲城市群一次区域性污染过程气象特征数值模拟[J]. 中山大学研究生学刊:自然科学医学版,2009,30(1):78-92.
- [17] 陈训来,冯业荣,王安宇,等. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J]. 中山大学学报:自然科学版,2007,46(4):103-107.
- [18] 王淑兰,张远航,钟流举,等. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响[J]. 中国环境科学,2005,25(2):133-137.
- [19] WU D, TIE X X, DENG X. Chemical characterizations of soluble aerosols in Southern China [J]. Chemosphere, 2006, 64:749-757.
- [20] 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报,2008,19(1):1-9.
- [21] 范绍佳,王安宇,樊琦,等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型[J]. 中国环境科学,2006,26(增刊):4-6.
- [22] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2013.