

广东省“人口—经济—土地—社会—生态” 城市化协调度时空变化及其聚类模式

李久枫¹, 余华飞¹, 付迎春^{1,2*}, 赵耀龙^{1,2}

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 广东省智慧国土工程技术研究中心, 广州 510631)

摘要:多维城市化协调度评价是衡量区域城市化质量的重要方面,探究城市化时空聚类模式则是分析区域城市化特征的有效方法。针对目前城市化协调度评价缺乏多维度时空综合分析的现状,本文以广东省为例,提出一种基于时空权重矩阵的复杂时空系统协调度评价模型,运用此模型分析2006-2014年城市化协调度的时空变化特征,并借助时空扫描方法分析其聚类模式。研究结论为:①近10年来城市化水平呈现3种时序特征,人口城市化水平表现出随时间均衡发展的“集中”特征,而经济与土地表现出低频次的“集中与分散”交替,社会、生态及综合水平表现出高频次的“集中与分散”交替;稳定型城市主要位于珠三角核心区。②各维度及综合系统协调度时空聚类区既有空间分异性又有重叠性,人口协调度时空聚类于粤西地区,经济与土地维度协调度时空聚类高度重合于珠三角与粤北地区,社会与生态维度协调度时空聚类交叉于珠三角与粤东地区,而综合系统协调度居中。此外,时空聚类区的人口、经济与社会维度的协调度稳定性要优于土地与生态维度。本文结论有助于揭示区域城市化的时空特征。

关键词:城市化协调度;时空变化;复杂时空系统协调度评价模型;时空聚类模式;广东省

1 引言

诺贝尔经济学奖得主斯蒂格利茨曾指出,美国的高科技与中国的城市化是21世纪最具影响力的两件事(斯蒂格利茨,1999)。这表明中国的城市化作用已经愈来愈突出,并为世界所瞩目。据《国家新型城镇化报告2015》统计,2015年全国常住人口城镇化率为56.10%,比世界平均水平高出约1.2%,其中2015年广东省常住人口城镇化率为68.71%,位居27省区之首(徐绍史等,2016)。随着城市化进程的不断加快,城市化质量显得愈发重要。目前,城市水平测度主要有单一指标法和综合指标法(陈明星等,2009;张同升等,2002),单一指标法主要是计算城镇人口及城市用地占比等,综合指标法包含人口、经济、社会、文化与景观等(欧向军

等,2008)。众多学者研究表明,单一的城市化水平测度很难全面反映城市化的内涵(范辉等,2014;李德胜等,2016),城市化水平评价已由一维向二维(郭施宏等,2014)、三维(Wang et al, 2011; Sun et al, 2013)、四维(Wang et al, 2014; You, 2016)转变。国外城市化研究主要限于健康城市、可持续发展城市,城市化发展质量的概念几乎没有形成(王德利等,2012)。虽然,目前国内外并无公认的城市化发展质量评价模型(方创琳等,2011),但国内学者研究城市化综合水平主要是对人口、经济、空间、社会、生态5个维度的优化组合。同时城市化耦合协调研究也随着城市化内涵的不断延伸愈加丰富。协调是指系统各要素间或由两个以上系统通过要素间的关系耦合形成的复合系统之间,通过长期必要的磨合而形成的一种互补、协同、融洽、和谐的关系,

收稿日期:2017-04-17;修订日期:2017-09-18。

基金项目:国家自然科学基金项目(41101152);广东省科技计划项目(2015A010103013)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41101152; Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China, No.2015A010103013]。

作者简介:李久枫(1993-),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事环境遥感与定量遥感研究,E-mail: 2016022047@m.scnu.edu.cn。

通讯作者:付迎春(1976-),女,云南武定人,博士,教授,从事定量遥感、时空分析与地表过程模拟研究,E-mail: fuyc@m.scnu.edu.cn。

引用格式:李久枫,余华飞,付迎春,等.2018.广东省“人口—经济—土地—社会—生态”城市化协调度时空变化及其聚类模式[J].地理科学进展,37(2):287-298.[Li J F, Yu H F, Fu Y C, et al. 2018. Spatial-temporal changes of population-economy-land-society-ecology coordination level of urbanization and clustering: A case of Guangdong Province, China[J]. Progress in Geography, 37(2): 287-298.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.011

从而表现最佳的整体效应或功能(牛文元, 2006; 李秀霞等, 2010)。如果协调度的量度用 $[0, 1]$ 区间的数字来表示, 数值越接近于1表示系统越和谐, 城市化发展越有序; 数值越接近于0表示系统越紊乱, 城市化发展越不稳定。当前城市化耦合协调分析分为内在与外在分析(孙平军等, 2012), 已有文献研究表明, 只注重单一维度的城市化会带来诸多问题, 如城市化整体协调水平下降(Sun et al, 2013)、城市化系统内部存在城乡发展不协调及时空的不平衡性(Wu et al, 2016)、社会城市化与生态城市化滞后于经济城市化(Liu et al, 2014)、生态城市化质量下降(Ai et al, 2016)等不协调现状。而在城市化耦合协调度研究方法及角度上, 主要是运用熵值法、主成分分析法、因子分析法、变异系数法等进行城市化综合水平评价, 借助耦合度模型及协调发展度模型进行协调度分析。空间分析以探索性空间分析方法居多(Qi et al, 2013; 张旺等, 2013; 刘善开等, 2015; Liu et al, 2016; Wu et al, 2016), 未很好地考虑时空因子的综合影响, 并在连续时空序列协调度聚类模式的研究上显得薄弱。

本文提出一种新的时空协调度评价模型, 即复杂时空系统协调度模型, 它综合考虑城市化系统的时空影响, 与一般复杂系统的主要区别为首次采用时空权重矩阵。目前系统协调度评价模型主要包括3种: 距离型、变化型、综合型, 各有优缺点, 相关文献研究表明综合型精确度最高(陈黎明等, 2013)。在借鉴陈文峰等(2011)、Zhao等(2015)、Wu等(2016)、慕智玉等(2016)相关学者研究的基础上, 本文认为城市化应是人口、土地、经济、社会、生态5个系统的有机统一, 其中土地城市化代表城市地域的扩展, 经济城市化代表城市地域非农经济的集中, 人口城市化代表非农人口向城市地域的集中, 社会城市化代表城市基础设施和公共服务的完善程度, 生态城市化代表城市区域生态环境的治理水平。

广东省作为中国改革开放的前沿地带, 也是中国经济最发达的省份之一, 但是区域经济发展的差距造成了区域城市化水平的极其不均衡(邱福林, 2010)。由于经济发展水平的不同, 广东省城市化水平大致分为3个层次: 珠三角地区水平最高, 其次为粤东和粤西地区, 第三为粤北地区(王少剑等, 2015); 同时广东省各区域存在产业城市化与社会城市化失衡、工业化动力不足等问题(赵祥, 2014)。

因此本文以广东省各地级市为例, 在构建人口—土地—经济—社会—生态五维城市化综合评价体系的基础上, 通过融合熵值法与反距离加权法构建时空权重矩阵, 引入复杂系统协调度基本原理, 建立基于时空权重矩阵的复杂时空系统协调度评价模型, 用于评价城市化各子系统与综合系统的时空协调度, 并借助时空扫描方法分析其时空聚类模式, 以期应用复杂时空系统协调度评价模型提供实例借鉴, 并在此基础上揭示经济发达地区的区域城市化特征。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域

广东省位于中国大陆最南部, 纬度跨北纬 $20^{\circ}09' \sim 25^{\circ}31'$, 经度跨东经 $109^{\circ}45' \sim 117^{\circ}20'$, 下辖21个地级市, 省域面积约17.97万 km^2 , 划分为4个经济区, 其中珠江三角洲经济区共9个地级市, 分别为广州、深圳、珠海、佛山、江门、中山、东莞、惠州、肇庆; 粤东经济区共4个地级市, 分别为汕头、潮州、揭阳、汕尾; 粤西经济区共3个地级市, 分别为湛江、茂名、阳江; 粤北经济区共5个地级市, 分别为河源、清远、梅州、韶关、云浮。2015年全省GDP总量为72812.55亿元, 人均GDP为67503元, 第一、二、三产业结构为4.6:44.6:50.8(%); 4个经济区中, 珠江三角洲经济区占全省GDP的79.2%, 粤东、粤西、粤北经济区分别占6.9%、7.7%、6.2%。从人口城市化发展来看, 广东省常住人口城镇化率由2005年的60.68%上升到2015年的68.71%, 年均增长约0.8个百分点, 其区域城市化水平分布极不均衡。

2.2 数据来源

本文采集的数据主要涉及以下部分: 常住人口城镇化率、年末常住人口、人均GDP、固定资产投资、全市建成区绿化覆盖率、建成区面积、农业人口总数、户籍人口总人数、二三产业从业人员总数、全社会从业总人数、地区生产总值、行政区总面积、全市建成区绿化覆盖面积和工业固体废物综合利用率等指标的数据来源于2006-2015年度《广东统计年鉴》及广东省各市的统计年鉴; 人均城市道路面积、每万人拥有公共汽车、每万人在校大学生数、每万人医院床位数等指标的数据来源于2006-2015年度《中国城市统计年鉴》。其中二三产业从业人员比重、城镇常住人口比重、地均GDP密度、人均建成

区面积通过相关指标计算得到。由于数据获取的限制,其中个别城市某些年份的人均城市道路面积、工业固体废物综合利用率、全市建成区绿化覆盖率、每万人拥有公共汽车等指标数据存在缺失情况,本文采用相邻年份进行插值补齐。

2.3 研究方法

2.3.1 复杂时空系统协调度评价模型

本文根据李晖煜等(2008)提出的复杂系统协调度评价模型的基本原理,基于熵值法—反距离加权法构建时空权重矩阵,将城市化评价指标体系与复杂系统协调度评价模型相结合,构建复杂时空系统协调度模型。首先将原始数据依据最大值最小值标准化方法进行标准化处理,然后求取时间权重。

(1) 熵值法求时间权重:

$$e_{ij} = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (1)$$

$$d_j = 1 - e_{ij} \quad (2)$$

$$W_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j \quad (3)$$

式中: e_{ij} 为某个地级市第 j 个指标的熵值; k 为常数; n 为指标个数; P_{ij} 为某个地级市第 j 项指标下第 i 个年份指标值占全部年份指标值的比重; d_j 为某个地级市第 j 个指标的差异性系数; W_j 为某个地级市第 j 项指标的权重(式(3))。

(2) 距离衰减函数求空间权重

空间反距离权重矩阵(Inverse-distance Based Spatial Weight Matrix)假定空间效应强度决定于距离,空间单元之间距离越近则空间效应越强(钟水映等, 2010)。本文采用距离衰减函数来构建空间反距离权重矩阵,具体公式为:

$$W_{ab} = e^{-d_{ab}^\tau} \quad (4)$$

式中: a 、 b 代表任意两个地级市; d_{ab} 为 a 地区与 b 地区质心之间的直线距离; W_{ab} 为 a 地区相对于 b 地区或 b 地区相对于 a 地区的空间权重; τ 取决于所有相邻地区之间的平均距离以及标准化的距离衰减参数 l ($0 < l < 1$)。 l 越小,互相影响随距离衰减的速度就越慢。其中将 l 定义为:

$$l = 1 - e^{-D} \quad (5)$$

式中: D 为各地区之间距离的平均值。参照已有文献,将 l 赋值为 0.5(钟水映等, 2010),并依据式(5)反推出参数 τ 。基于以上方法算得的空间权重矩阵,需要进行行标准化,使得各行元素之和为 1(王德文

等, 2004)。

(3) 构建熵值法—反距离加权法时空权重矩阵

本文通过熵值法求取各地级市在时间上的权重,构建时间权重矩阵;又通过借用距离衰减函数构建空间反距离权重矩阵,达到压缩空间信息的目的。由于时间权重矩阵和空间反距离权重矩阵具有可分性(Huang et al, 2010),因此本文通过结合时间权重矩阵与空间权重矩阵构建各地级市在各指标上的时空权重矩阵,具体公式如下:

$$W_{st} = W_s \times W_t \quad (6)$$

式中: W_{st} 为时空权重矩阵, W_s 为空间反距离权重矩阵,由式(4)计算得出, W_t 为时间权重矩阵,由式(1)-(3)计算得出。

(4) 构建复杂时空系统协调度评价模型

设城市化综合系统由人口城市化子系统、经济城市化子系统、土地城市化子系统、社会城市化子系统和生态城市化子系统(I_1, I_2, I_3, I_4 和 I_5)组成,各子系统的实际发展水平由 E_1, E_2, E_3, E_4 和 E_5 来表示,它们分别是各自组成要素的函数,由各子系统的指标与时空权重数据乘积求和所得,而综合系统发展水平由 E^* 表示,具体形式为:

$$E^* = \sum_{i=1}^5 E_i w_i \quad (7)$$

式中: w_i 表示各子系统相对于复杂时空系统的重要性权重,由式(6)各子系统中各指标的时空权重相加得到。

对于各系统在 t 时刻的发展速度可表示为此刻的偏导数:

$$\left(\frac{dE_i}{dt} \right)_t = \frac{(E_i)_t - (E_i)_{t-1}}{(E_i)_{t-1}}, \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (8)$$

式中: $(E_i)_t$ 和 $(E_i)_{t-1}$ 分别表示系统在 t 时刻和 $t-1$ 的实际发展水平;而复杂时空系统的综合发展水平亦可由式(7)求出,表示为 $\left(\frac{dE^*}{dt} \right)_t$ 。则各子系统的系统发展速度的协调度 C_i 定义为:

$$C_i = \begin{cases} \exp \left[\left(\frac{dE_i}{dt} \right)_t - \left(\frac{dE^*}{dt} \right)_t \right], & \left(\frac{dE_i}{dt} \right)_t < \left(\frac{dE^*}{dt} \right)_t \\ 1, & \left(\frac{dE_i}{dt} \right)_t = \left(\frac{dE^*}{dt} \right)_t \\ \exp \left[\left(\frac{dE^*}{dt} \right)_t - \left(\frac{dE_i}{dt} \right)_t \right], & \left(\frac{dE_i}{dt} \right)_t > \left(\frac{dE^*}{dt} \right)_t \end{cases} \quad (9)$$

综合系统的整体发展速度的协调度定义为:

$$C^* = \sqrt[5]{\prod_{i=1}^5 C_i} \quad (10)$$

式中: $\frac{dE^*}{dt}$ 表示综合系统整体的发展速度, $\frac{dE_i}{dt}$ 表示各子系统的发展速度。当二者速度相等时, 表明子系统的发展速度与综合系统的整体发展速度相等, 处于最优协调发展状态。根据式(9)-(10), 各系统协调度 $C_i \in [0, 1]$, 当且仅当 $\left(\frac{dE_i}{dt}\right)_i = \left(\frac{dE^*}{dt}\right)_i$ 时, C^* 达到最大值。

2.3.2 时空聚类方法

时空扫描统计旨在探测一定时空范围内聚集性与随机分布是否显著增加, 有助于发现聚集性可能异常的时空事件集合(唐建波等, 2013)。SatScan软件是当今有代表性的时空热点扫描技术(Shi et al, 2014; 王劲峰等, 2014), 在疾病时间聚集性或区域聚集性分析等方面应用广泛(Kulldorff, 1997; Gregorio et al, 2007; 樊文洁等, 2015)。目前 SatScan 时空扫描统计方法已被引入到地理学研究中, 时空扫描统计方法相对于空间自相关分析更容易探测出地理要素的时空聚集区域(王培安等, 2012), 在经济类型的资源配置与自然灾害的时空聚类研究方面成果显著(白永平等, 2012; 李双双等, 2016)。本文选用 SaTScan v9.4.4 软件中的前瞻性时空重排扫描统计量模型进行分析。该模型是 Kulldorff 于 2005 年提出的一种时空扫描模型, 它同时考虑了时间与空间因素, 并以不同的时空半径对研究区域进行动态扫描, 探测某种特征的时空聚集区域(Kulldorff, 1997; Kulldorff et al, 2005)。该模型能改变时空参数和借助蒙特卡洛随机法进行模拟并检验, 以便检验出最有可能聚集的区域。

3 结果与分析

3.1 城市化综合测度分析

从当前中国城市化发展的现状考虑, 强调人口、经济、土地、社会与生态的协同共进与可持续发展, 城市化水平的提高不仅仅是城镇人口的增长、城市土地面积的扩展, 同时是经济生产的转变、单位经济效益的提高、可提供更多的就业岗位, 以及有足够的公共基础设施容纳更多的城镇人口, 为城镇人口提供教育、医疗、公共交通等服务; 而且是人

居环境质量与资源利用效率的提高, 可提供更好的生态服务产品。因此在遵循指标选取的科学性、独立性、多维性、可操作性等原则的基础上, 综合评价体系的构建贯彻以人为本的城市化理念, 在人口、土地、社会城市化指标构建中多采用人口相关指标(常住人口城镇化率、常住城镇人口、人均建成区面积、人均城市道路面积、每万人在校大学生人数、每万人拥有公共汽车、每万人医院床位数)。同时尽量避免长时间跨度内行政区划调整造成指标大幅度变化的影响, 借鉴孙平等(2012)的指标选取结果, 在土地城市化指标中选取建成区面积作为基本衡量指标。此外指标选取应尽可能多方面体现城市化的发展水平, 研究最终选取 16 个评价指标对近 10 年广州城市化水平进行综合测度, 通过城市化综合评价体系(表 1)与时空权重矩阵的构建, 最终得出各维度城市化水平。

由图 1 可以得出, 2005-2014 年城市化各维度及综合系统都呈现出上升的趋势, 其中经济、土地及综合的城市化上升速率较快, 人口城市化水平相对其他维度较高, 生态城市化有波动趋势。在时序上: 人口维度趋向集中, 经济维度呈现集中—分散—集中变化趋势, 土地维度呈现分散—集中—分散—集中变化趋势, 这表明经济与土地时序特征交替频次较低; 社会维度呈现分散与集中交替变化总体趋向分散的趋势, 生态维度呈现分散与集中交替变

表 1 城市化综合评价体系

Tab.1 Comprehensive urbanization evaluation system

一级指标	二级指标	变化趋向
人口城市化 I_1	常住人口城镇化率 $X_1/\%$	正向
	第二、三产业从业人员比重 $X_2/\%$	正向
	常住城镇人口 $X_3/\text{万人}$	正向
经济城市化 I_2	人均 GDP $X_4/\text{元}$	正向
	第二、三产业产值比重 $X_5/\%$	正向
	固定资产投资 $X_6/\text{亿元}$	正向
	地均 GDP 密度 $X_7/(\text{亿元}/\text{km}^2)$	正向
综合 城市化	土地城市化 I_3 人均建成区面积 $X_8/(\text{m}^2/\text{人})$	正向
	人均城市道路面积 $X_9/(\text{m}^2/\text{人})$	正向
	建成区面积 X_{10}/km^2	正向
社会城市化 I_4	每万人在校大学生人数 $X_{11}/\text{人}$	正向
	每万人拥有公共汽车 $X_{12}/\text{辆}$	正向
	每万人医院床位数 $X_{13}/\text{张}$	正向
生态城市化 I_5	全市建成区绿化覆盖率 $X_{14}/\%$	正向
	全市建成区绿化覆盖面积 X_{15}/hm^2	正向
	工业固体废物综合利用率 $X_{16}/\%$	正向

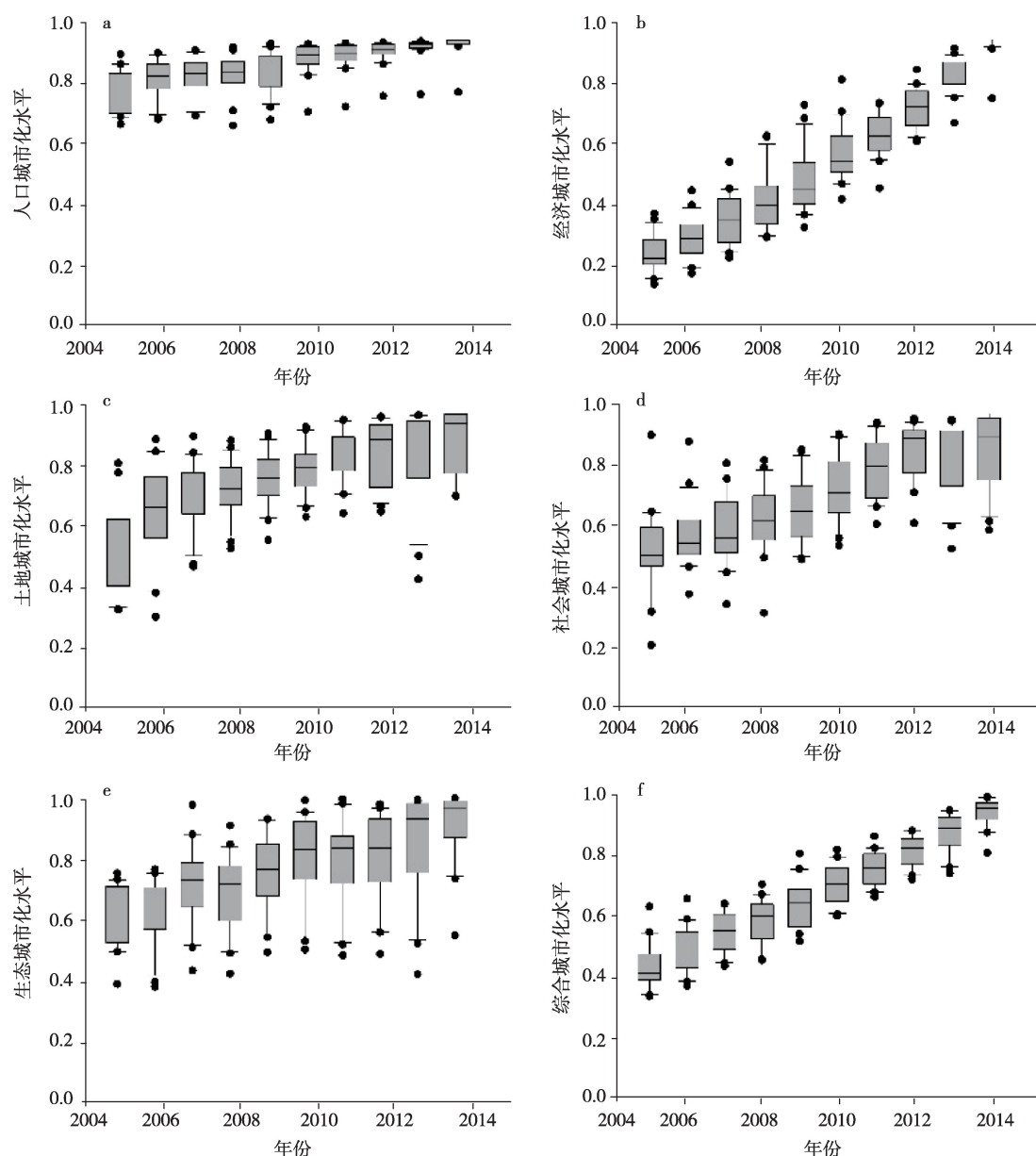
图1 2005-2014年广东省各地级市城市化水平箱形四分距图^①

Fig.1 Urbanization level four-point distance map in Guangdong Province, 2005-2014

化总体趋向集中的趋势,综合系统呈现集中与分散交替变化总体趋向集中的趋势。表明经济、土地与综合系统时序特征交替频次较高,总体可见经济、土地、社会、生态及综合维度城市化呈现集中与分散趋势显著。就各维度相似性来看,人口维度特征独立,经济、土地维度较为相似,社会、生态维度及综合系统具有一定相似性,这种相似性是否在空间以及时空综合角度上也表现出一定的相同特征,是

本文进行探讨的重点之一。因此有必要对这3种不同特征的时空协调度及其时空聚类模式作进一步的分析。

3.2 协调度时空变化特征

研究以5个维度近10年城市化水平得分及综合系统得分为面板数据,运用复杂时空系统协调度模型对2006-2014年广东省城市化协调发展状况进行评价。借鉴相关学者研究成果(陈黎明等, 2013),

^①每幅图中的黑点表示异常点,上下两端的横线表示90%、10%分位,灰色箱子的上下部分表示75%、25%分位,灰色箱子中间的横线表示中位数位置,灰色箱子的长短表示数据分散的程度,越长表示越分散。

依据研究数据特征及广东省城市化发展差异将城市化协调发展类型划分(表2)。依据不同等级,各地级市不同年份的各维度城市化协调发展等级分布如图2所示。绝大部分城市较多年份的协调度发展类型聚集在1级,其次为2级,3、4、5级占比极低。表明广东省各地区各系统城市化基本处于协调阶段,其中大部处于优质协调阶段,其次为良好协调阶段,少量处于中度协调与初级协调,个别处于不协调阶段。

本文依据不同地区城市化协调度等级的时序变化趋势(表3),将其归纳为3类特征:稳定型、波动型、交叉型。图3表明了各地区不同系统协调度等级的时序变化情况:从各维度及综合系统来看,波动型城市居多,各类型城市集中的区域特征较为明

显,各维度及综合系统稳定型城市主要位于珠三角经济区,其中广州、佛山、江门等城市表现突出。非稳定型城市主要位于珠三角外围地区,人口、土地、社会及生态维度的波动型城市主要位于湛江至清远一线,人口、经济及土地维度的交叉型城市主要位于韶关至潮州一线,表明广东省各城市不同维度具有明显的带状分布特征,且珠三角地区具有较高的稳定性;这种高稳定性的协调发展可承载更多的经济活动,进而集聚多样的城市化发展类型,对周边形成巨大的辐射效应;而珠三角外围地区波动性较大,对于容纳多样的城市化发展类型相对困难,但集聚某一种城市化类型可能更为突出,综合系统考虑了其他5个子系统的协调度情况,各类型城市分布表现较为分散。以上分析表明,在一定的经济区域内,不同城市城市化协调度时序变化一定程度上存在相似特征,而相同时序特征在空间上存在集聚性,它极可能代表了一个区域的时空聚类模式,这也验证了本文3.1小节的推论,因此有必要对其时空聚类模式作进一步分析。

3.3 时空协调度聚类模式分析

根据本文数据特性,前瞻性时空重排扫描统计量模型无法对小数位数进行有效分析,为保证数据

表2 城市化协调度类型		
Table.2 Urbanization coordination types		
协调度区间	协调类型	等级
0.90~1.00	优质协调	1级
0.80~0.90	良好协调	2级
0.70~0.80	中度协调	3级
0.60~0.70	初级协调	4级
0.00~0.60	不协调	5级

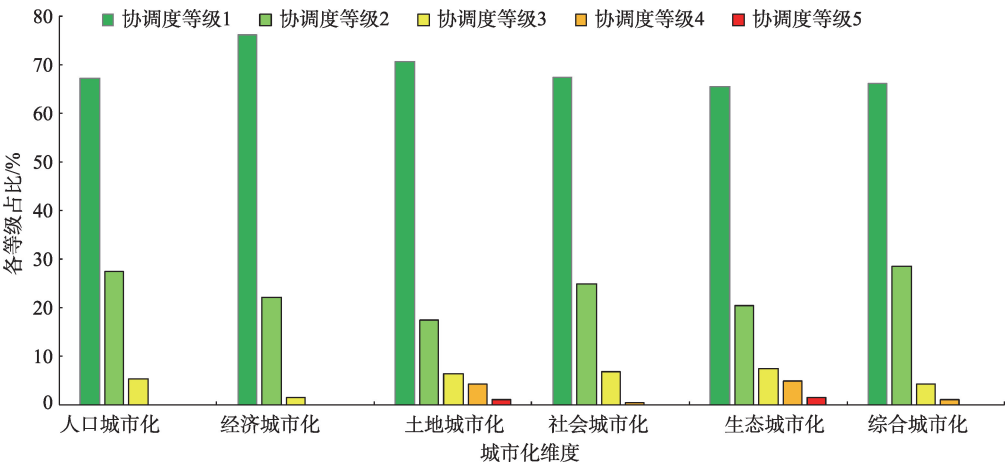


图2 2006-2014年广东省各城市城市化协调度等级占比

Fig.2 Proportion of urbanization coordination level of cities in Guangdong Province, 2006-2014

表3 城市化协调度等级时序变化特征	
Tab.3 Characteristics of urbanization coordination level time series	
类型	指示特征
稳定型	指示城市化时序协调等级始终处于一种稳定状态,或由一种稳定状态过渡到另一种稳定状态,抑或仅有一个异常年份的曲线特征。
波动型	指示城市化时序协调等级先升(降)后降(升)或者始终处于一种不稳定的变换状态,抑或具有类似状态的曲线特征。
交叉型	指示前期稳定型(波动型)与后期波动型(稳定型)的曲线特征。

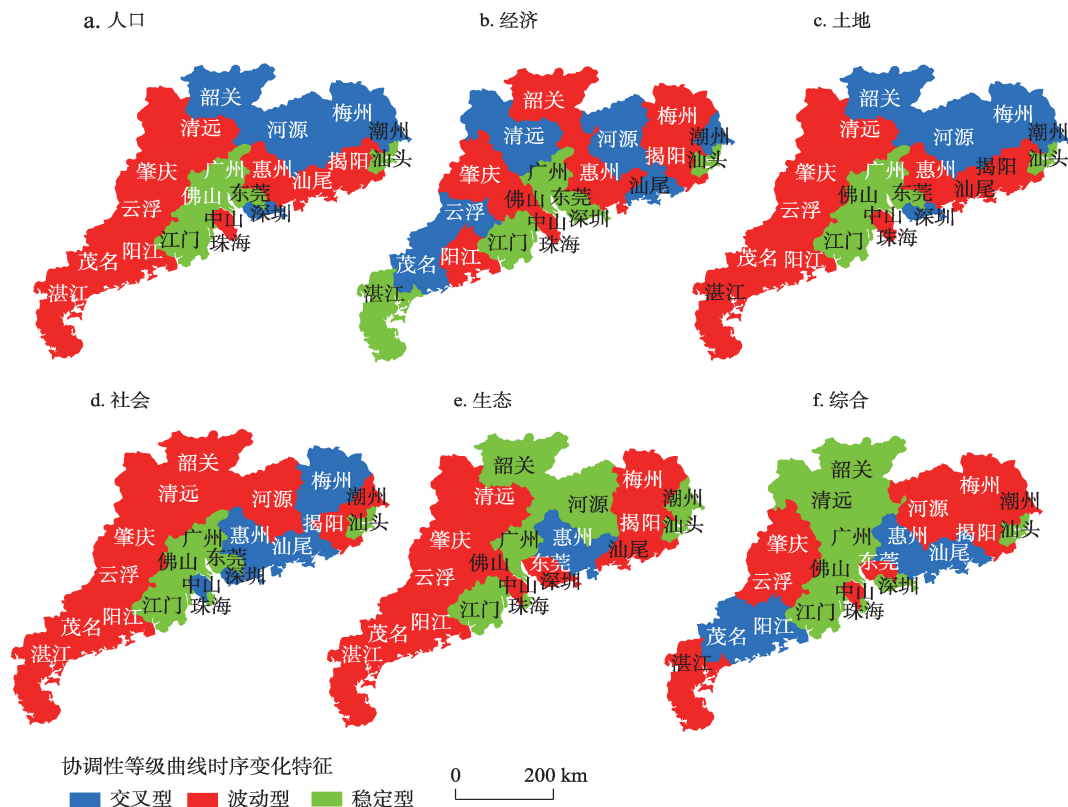


图3 城市化协调度时序变化趋势分布

Fig.3 Urbanization coordination level time series trend distribution

精度,将2006-2014年各子系统与综合系统协调度评价价值扩大1万倍,前瞻性时空重排扫描统计量模型无需人口数据,需要的文件数据为各协调度数据文件、地理坐标文件,本文将最小时间周期设为研究时段的50%,以1年为单位,蒙特卡洛模拟次数为999,时空聚类结果统计显著性检验水平为 $P<0.001$ 。研究结果以shpae文件格式输出并导入ArcGIS软件进行可视化表达。

由图4可以得出,人口维度协调度时空聚类范围以湛江市为聚类中心,主要分布于粤西;经济、土地维度协调度时空聚类范围主要分布于珠三角及粤北;社会维度协调度时空聚类范围以深圳为中心,主要分布于珠三角;生态维度协调度时空聚类范围主要分布于粤东与粤北;综合系统协调度时空聚类范围以惠州为中心,覆盖了珠三角、粤北及粤东部分地区。就各维度及综合系统时空聚类辐射范围来说,经济>土地>人口>生态>综合>社会,表明经济与土地城市化的辐射能力最强,社会城市化的辐射能力最弱。同时各维度及综合系统既有时空分异特征,而整体又表现为多个时空聚集区相重

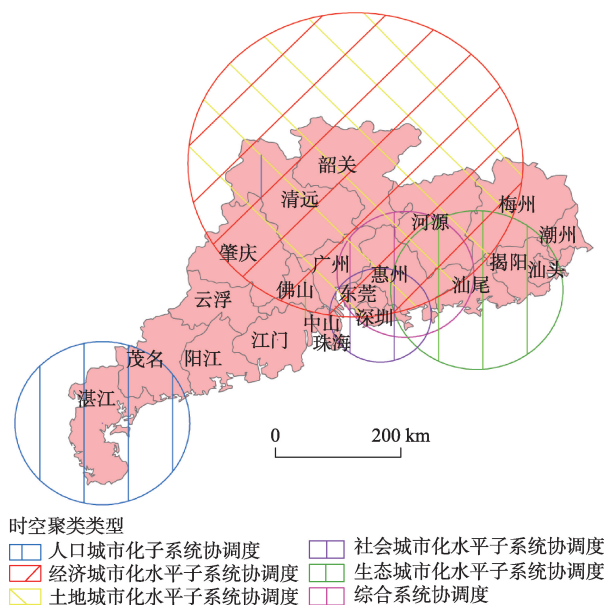


图4 广东省城市化协调度时空聚类图

Fig.4 Spatial-temporal clustering of urbanization coordination level in Guangdong Province

叠,表明城市化时空协调度的聚类特征十分明显,经济与土地城市化仍然是推动城市整体发展的主

要驱动力,经济、土地、人口与生态城市化辐射能力均大于综合城市化,这表明广东省不同区域不同维度的城市化水平均较为超前,而社会城市化辐射能力显得相对不足,凸显出城市的公共服务仍然是需要补齐的短板。

将各聚类时段聚类区域及辐射区域城市的协调度等级进行统计分析表达(图5),可见各聚类模式的城市化协调度并不十分稳定。从聚类模式内部协调度组成来看,人口、经济与社会维内部较为单一且协调度等级高,表现出较高的稳定性;综合系统次之;土地与生态维度内部协调度等级复杂,稳定性较差,表明人口、经济与社会维度稳定性优于综合水平,土地与生态维度稳定性劣于综合水平。虽然广东省不同区域形成了不同的聚类模式,但其聚类模式内部各异。例如土地与生态城市化协调度时空聚类模式更为脆弱,表明此类聚类模式很难持续发展,随着时间的发展可能会消失或者转移到其他区域。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文运用复杂时空系统协调度评价模型及时空扫描方法研究五维城市化协调度及其聚类模式问题,主要结论如下:

(1) 复杂时空系统协调度评价模型揭示了城市化不同维度协调度的时空变化特征。其中人口、经济、土地、社会、生态及综合表现出3种较为独立的时序变化特征,各维度协调度等级时序变化特征在空间上呈现出空间上的集聚性。通过结合空间上的集聚性进行推断,人口城市化完全不同于其他维度的时序变化特征可能表现为偏离聚类核心区的趋向,经济与土地城市化相似的时序变化特征可能表现为趋同的时空聚类区域,社会、生态及综合城市化相似的时序变化特征可能说明其时空聚类区域相近,而经济、土地、社会、生态及综合城市化时序变化皆出现集中与分散特征,这可能表明其存在一定的时空重叠性,而这些都预示着广东省城市化在时空序列的演进中会呈现不同的聚类特征。

(2) 2006-2014年间,广东省各地区各维度及综合系统协调度为优质协调>良好协调>中度协调>初级协调>不协调,且优质协调占据绝对优势地位,协调度等级时序变化曲线特征主要为波动型、稳定型

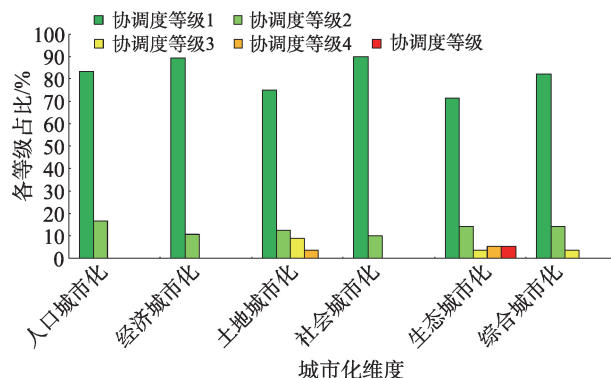


图5 各时空聚类区域城市协调度等级分布

Fig.5 Distribution of Urbanization coordination level of each spatial-temporal cluster

与交叉型,区域特征显著。从不同维度及综合系统城市化协调度等级分布来看,土地、社会及生态城市化占低等级比重较多,主要位于初级协调与中度协调,人口、经济及综合城市化协调等级高。协调度稳定型城市主要位于珠三角经济区,非稳定型城市主要位于珠三角外围经济区。

(3) Satscan时空扫描分析方法进一步证明了复杂时空系统协调度评价模型所表达的时序与空间特征。分析表明,广东省各系统协调度时空聚类模式空间分异特征明显,除人口城市化协调度外,各维度及综合系统时空聚类特征空间具有重叠性,省域上具有3种时空聚类模式分离特征:人口、经济、土地,社会、生态及综合系统时空聚类辐射,影响范围经济、土地>人口>生态>综合>社会;人口、经济与社会城市化协调度时空聚类模式最为稳定,土地及生态城市化协调度时空聚类模式较为脆弱。人口城市化协调度聚类模式与其他模式偏离,这印证了之前“广东省城市化在时空序列的演进中会呈现不同聚类特征”的推论。综合系统协调度聚类区域涵盖了除人口城市化协调聚类模式以外的所有聚类模式,这表明综合系统发展更加倾向于多维度的协调发展。

4.2 讨论

(1) 珠三角成为协调度时空聚类交叉核心区。珠三角城市群作为中国协调发展水平较高的城市群之一,其协调发展具有自身的特色优势,在社会组织、空间发展、经济运行、公共设施、生态环境等方面采取了一系列协同发展政策,制定共同的区域准入门槛(熊雪茹等, 2013)。珠三角外围城市协调度较差,在时空序列演进上存在一定程度的波动,

粤东、粤西、粤北大多为波动型和交叉型。外围城市大部分地区经济相对欠发达,较好的生态环境是其可持续发展的重要依赖(罗小虹等, 2014),比如粤北的韶关与河源、粤东的潮州与汕头其生态城市化协调度时序变化上表现优越。因此在制定城市发展战略时需因地制宜,可重点向生态型城市方向发展。

(2) 广东省区域城市化特征。广东省人口城市化协调度聚类模式与其他模式偏离,即人口城市化协调发展具有特殊性,珠三角地区及其辐射的周边城市人口城市化过于超前(丘林润, 2015),其发展很难与综合系统协调匹配,成为人口城市化协调度聚类模式最为偏离广东省核心区域。经济与土地系统协调度聚类特征完全重合,其辐射范围囊括了珠三角、粤北经济区。虽然其结果为理论上的重合性,但也说明珠三角及粤北地区在经济发展与城市土地扩张方面存在高度的时空聚集特征,也彰显了这一地区在广东省城市化进程中的核心地位。社会城市化协调度聚类区域为东莞、惠州、汕尾等地,辐射范围主要涵盖深圳、珠海、中山等地,此聚类模式所含城市的公共设施、社会综合服务水平、人口素质、社会整体文明与城市整体发展相协调。生态城市化协调度聚类区域为粤东及粤北,因为该地区是广东省主要的生态环境保护区,人类活动综合胁迫指数远小于珠三角经济区,随着社会经济全面发展,人类活动胁迫对生态环境的影响逐渐加重(柏超等, 2014),因此要着重保护生态核心区,树立“绿水青山就是金山银山”的城市发展理念,共同维护广东生态屏障。综合系统既涵盖了经济、土地、社会系统协调度等聚类区域,又侧重于生态系统协调度聚类地区,其结果更加表明城市化协调度评价应基于多维度分析。

(3) 城市化协调度时空聚类模式。目前城市化协调度评价方法主要是基于时序的分析,对于空间影响研究较为缺乏。运用探索性分析方法在一定程度上顾及了空间影响,但由于其时间序列分析较短,因此对于时间角度研究略显不足。复杂时空系统协调度模型是基于时空权重矩阵构建的一种评价模型,考虑了时空的综合影响,对于城市化的时空影响分析更为全面。它在时空序列的演进中更加容易发现时空特征,进而探索其时空聚类模式,同时其对时空协调度语义的提取具有启示作用。但此模型仍存在一些缺陷,即对各系统之间的协调

度分析不足,更为擅长于各系统相对于整体系统的协调水平,需要进一步完善。而在城市化协调度时空聚类模式研究方面还没有成熟的案例可以借鉴,本文通过运用SaTScan时空扫描统计量软件进行时空聚类模式的分析,研究结果表明SaTScan可运用于城市化协调度时空聚类模式研究,聚类表达效果良好,可为分析城市化协调度聚类模式提供实例借鉴。

参考文献(References)

- 白永平, 王培安. 2012. 浙江省集聚经济类型的资源配置效应分析[J]. 资源科学, 34(3): 510-519. [Bai Y P, Wang P A. 2012. Agglomerative economies' effects on resources allocation in Zhejiang Province[J]. Resources Science, 34(3): 510-519.]
- 柏超, 陈敏, 肖荣波, 等. 2014. 广东省生态环境胁迫综合评价研究[J]. 广东农业科学, 41(14): 144-148, 172. [Bai C, Chen M, Xiao R B, et al. 2014. Research on the assessment system of the eco-environmental stress in Guangdong Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 41(14): 144-148, 172.]
- 陈黎明, 钱利英, 沙士民. 2013. 3E系统协调度评价模型应用及其比较研究[J]. 科技管理研究, 33(21): 61-65, 82. [Chen L M, Qian L Y, Sha S M. 2013. Comparison study on 3E system coordinating evaluation models[J]. Science and Technology Management Research, 33(21): 61-65, 82.]
- 陈明星, 陆大道, 张华. 2009. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 64(4): 387-398. [Chen M X, Lu D D, Zhang H. 2009. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization[J]. Acta Geographica Sinica, 64(4): 387-398.]
- 陈文峰, 孟德友, 贺振. 2011. 河南省城市化水平综合评价及区域格局分析[J]. 地理科学进展, 30(8): 978-985. [Chen W F, Meng D Y, He Z. 2011. Comprehensive evaluation and spatial pattern of regional urbanization level in Henan [J]. Progress in Geography, 30(8): 978-985.]
- 樊文洁, 王山, 曹红艳, 等. 2015. 时空统计方法[J]. 中华流行病学杂志, 36(1): 83-86. [Fan W J, Wang S, Cao H Y, et al. 2015. Spatio-temporal statistical method[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 36(1): 83-86.]
- 范辉, 刘卫东, 吴泽斌, 等. 2014. 浙江省人口城市化与土地城市化的耦合协调关系评价[J]. 经济地理, 34(12): 21-28. [Fan H, Liu W D, Wu Z B, et al. 2014. The coupling coordination evaluation between population urbanization and land urbanization in Zhejiang Province[J]. Economic Geography, 34(12): 21-28.]

- 方创琳, 王德利. 2011. 中国城市化发展质量的综合测度与提升路径[J]. 地理研究, 30(11): 1931-1946. [Fang C L, Wang D L. 2011. Comprehensive measures and improvement of Chinese urbanization development quality[J]. Geographical Research, 30(11): 1931-1946.]
- 郭施宏, 王富喜, 高明. 2014. 山东半岛人口城市化与土地城市化时空耦合协调关系研究[J]. 经济地理, 34(3): 72-78. [Guo S H, Wang F X, Gao M. 2014. Spatial-temporal coupled coordination between population urbanization and land urbanization in Shandong Peninsula[J]. Economic Geography, 34(3): 72-78.]
- 李德胜, 王占岐, 蓝希. 2016. 环鄱阳湖城市群人口城市化与土地城市化协调度评价[J]. 国土资源科技管理, 33(1): 16-23. [Li D S, Wang Z Q, Lan X. 2016. Evaluation on coordination between population urbanization and land urbanization of Poyang Lake agglomeration[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 33(1): 16-23.]
- 李双双, 杨赛霓, 刘焱序, 等. 2016. 1960-2013年京津冀地区干旱—暴雨—热浪灾害时空聚类特征[J]. 地理科学, 36(1): 149-156. [Li S S, Yang S N, Liu Y X, et al. 2016. Spatio-temporal clustering characteristics of drought, heavy rain and hot waves in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960-2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 36(1): 149-156.]
- 李秀霞, 温欣欣. 2010. 农村剩余劳动力转移与城市化协调发展实证研究[J]. 人口学刊, (1): 57-61. [Li X X, Wen X X. 2010. The demonstration study on the transfer of rural surplus labor force and the coordinated development of urbanization[J]. Population Journal, (1): 57-61.]
- 李煜煜, 赵涛. 2008. 复杂系统协调度评价模型研究[J]. 中国农机化, (6): 44-46. [Li X Y, Zhao T. 2008. Study of coordinating evaluation model for composite system[J]. Chinese Agricultural Mechanization, (6): 44-46.]
- 刘善开, 韦素琼, 高月华, 等. 2015. 基于耦合模型的城市土地集约利用与城市化协调发展研究: 以福建省9个设区市为例[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 31(2): 96-105. [Liu S K, Wei S Q, Gao Y H, et al. 2015. Study on the coordinative development between urban land intensive utilization and urbanization based on coupling model: A case study of 9 cities divided into districts in Fujian Province[J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 31(2): 96-105.]
- 罗小虹, 吴旗韬. 2014. 广东珠江三角洲外围城市协调度评价及发展策略[J]. 热带地理, 34(4): 561-567. [Luo X H, Wu Q T. 2014. Coordination degree in the economic-social-ecological systems of the rim cities around the Pearl River Delta[J]. Tropical Geography, 34(4): 561-567.]
- 慕智玉, 任平. 2016. 四川省耕地集约度与城镇化水平时空变化及耦合关系分析[J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 39(1): 128-135. [Mu Z Y, Ren P. 2016. Spatial-temporal characteristics and coupling relationship between urbanization and cultivated land intensive degree of Sichuan Province[J]. Journal of Sichuan Normal University: Natural Science, 39(1): 128-135.]
- 牛文元. 2006. 可持续发展的能力建设[J]. 中国科学院院刊, 21(1): 7-13. [Niu W Y. 2006. The capacity building of sustainability in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 21(1): 7-13.]
- 欧向军, 甄峰, 秦永东, 等. 2008. 区域城市化水平综合测度及其理想动力分析: 以江苏省为例[J]. 地理研究, 27(5): 993-1002. [Ou X J, Zhen F, Qin Y D, et al. 2008. Study on compression level and ideal impetus of regional urbanization: The case of Jiangsu Province[J]. Geographical Research, 27(5): 993-1002.]
- 邱福林. 2010. 广东区域城市化水平的动态分析与评价[J]. 广东行政学院学报, 22(5): 63-67. [Qiu F L. 2010. Dynamic analyses and rating on Guangdong regional urbanization degree[J]. Journal of Guangdong Institute of Public Administration, 22(5): 63-67.]
- 丘林润. 2015. 广东省人口城镇化与土地城镇化协调水平分析[J]. 广东土地科学, 14(1): 21-28. [Qiu L R. 2015. An analysis on coordinated development between population urbanization and land urbanization in Guangdong[J]. Guangdong Land Science, 14(1): 21-28.]
- 斯蒂格利茨. 1999. 中国第二步改革战略[J]. 太平洋学报, (1): 10-19. [Joseph S. 1999. Zhongguo dierbu gaige zhan-lue[J]. Pacific Journal, (1): 10-19.]
- 孙平军, 丁四保, 修春亮. 2012. 北京市人口—经济—空间城市化耦合协调性分析[J]. 城市规划, 36(5): 38-45. [Sun P J, Ding S B, Xiu C L. 2012. Analysis of the coordination of population-economy-space in Beijing[J]. City Planning Review, 36(5): 38-45.]
- 唐建波, 邓敏, 刘启亮. 2013. 时空事件聚类分析方法研究[J]. 地理信息世界, 20(1): 38-45. [Tang J B, Deng M, Liu Q L. 2013. On spatio-temporal events clustering methods[J]. Geomatics World, 20(1): 38-45.]
- 王德利, 方创琳. 2012. 城市化发展质量研究进展及展望[J]. 现代城市研究, 27(7): 15-21. [Wang D L, Fang C L. 2012. Progress and prospect of study on urbanization development quality[J]. Modern Urban Research, 27(7): 15-21.]
- 王德文, 蔡昉, 张学辉. 2004. 人口转变的储蓄效应和增长效应: 论中国增长可持续性的人口因素[J]. 人口研究, 28(5): 2-11. [Wang D W, Cai F, Zhang X H. 2004. Saving

- and growth effects of demographic transition: The population factor in the sustainability of China's economic growth [J]. *Population Research*, 28(5): 2-11.]
- 王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 2014. 地理学时空数据分析方法 [J]. *地理学报*, 69(9): 1326-1345. [Wang J F, Ge Y, Li L F, et al. 2014. Spatiotemporal data analysis in geography [J]. *Acta Geographica Sinica*, 69(9): 1326-1345.]
- 王培安, 罗卫华, 白永平. 2012. 基于空间自相关和时空扫描统计量的聚集比较分析 [J]. *人文地理*, 27(2): 119-127. [Wang P A, Luo W H, Bai Y P. 2012. Comparative analysis of aggregation detection based on spatial autocorrelation and spatial-temporal scan statistics [J]. *Human Geography*, 27(2): 119-127.]
- 王少剑, 王洋, 赵亚博. 2015. 1990年来广东区域发展的空间溢出效应及驱动因素 [J]. *地理学报*, 70(6): 965-979. [Wang S J, Wang Y, Zhao Y B. 2015. Spatial spillover effects and multi-mechanism for regional development in Guangdong Province since 1990s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(6): 965-979.]
- 熊雪如, 覃成林. 2013. 我国城市群协调发展模式分析: 基于长三角、珠三角和长株潭城市群的案例 [J]. *学习与实践*, (3): 5-12. [Xiong X R, Qin C L. 2013. Woguo chengshiqun xietiaofazhan moshi fenxi: Jiyu Changsanjiao, Zhusanjiao he Changzhutan chengshiqun de anli [J]. *Study and Practice*, (3): 5-12.]
- 徐绍史, 胡祖才. 2016. 国家新型城镇化报告 2015 [M]. 北京: 中国计划出版社. [Xu S S, Hu Z C. 2016. *Guojia xinxing chengzhenhua baogao 2015* [M]. Beijing, China: China Planning Press.]
- 张同升, 梁进社, 宋金平. 2002. 中国城市化水平测定研究综述 [J]. *城市发展研究*, 9(2): 36-41. [Zhang T S, Liang J S, Song J P. 2002. Summarization of studies on measuring of urbanization in China [J]. *Urban Studies*, 9(2): 36-41.]
- 张旺, 周跃云, 胡光伟. 2013. 超大城市“新三化”的时空耦合协调性分析: 以中国十大城市为例 [J]. *地理科学*, 33(5): 562-569. [Zhang W, Zhou Y Y, Hu G W. 2013. Coupling mechanism and space-time coordination of new-approach urbanization, new-approach industrialization and service industry modernization in megacity behemoths: A case study of ten cities in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 33(5): 562-569.]
- 赵祥. 2014. 城市化失衡及其治理对策探析: 基于广东地级以上城市数据的实证分析 [J]. *贵州社会科学*, 299(11): 118-125. [Zhao X. 2014. Chengshihua shiheng jiqi zhili duice tanxi: Jiyu Guangdong diji yishang chengshi shuju de shizheng fenxi [J]. *Guizhou Social Sciences*, 299(11): 118-125.]
- 钟水映, 李魁. 2010. 人口红利、空间外溢与省域经济增长 [J]. *管理世界*, (4): 14-23. [Zhong S Y, Li K. 2010. The population dividend, the spatial spill-over and the provincial economic growth [J]. *Management World*, (4): 14-23.]
- Ai J Y, Feng L, Dong X W, et al. 2016. Exploring coupling coordination between urbanization and ecosystem quality (1985-2010): A case study from Lianyungang City, China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 10(3): 527-545.
- Gregorio D I, Huang L, DeChello L M, et al. 2007. Place of residence effect on likelihood of surviving prostate cancer [J]. *Annals of Epidemiology*, 17(7): 520-524.
- Huang B, Wu B, Barry M. 2010. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(3): 383-401.
- Kulldorff M. 1997. A spatial scan statistic [J]. *Communications in Statistics: Theory and Methods*, 26(6): 1481-1496.
- Kulldorff M, Heffernan R, Hartman J, et al. 2005. A space-time permutation scan statistic for disease outbreak detection [J]. *Plos Medicine*, 2(3): e59.
- Liu X, Cao G Z, Liu T, et al. 2016. Semi-urbanization and evolving patterns of urbanization in China: Insights from the 2000 to 2010 national censuses [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 26(11): 1626-1642.
- Liu Y Q, Xu J P, Luo H W. 2014. An integrated approach to modelling the economy-society-ecology system in urbanization process [J]. *Sustainability*, 6(4): 1946-1972.
- Qi Y J, Yu Y, Dong W. 2013. Coordination analysis on urbanization level and land use efficiency of Xinjiang based on ESDA [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(9): 1819-1823.
- Shi R X, Wang J F, Xu C D, et al. 2014. Spatiotemporal pattern of hand-foot-mouth disease in China: An analysis of empirical orthogonal functions [J]. *Public Health*, 128(4): 367-375.
- Sun P J, Song W, Xiu C L, et al. 2013. Non-coordination in China's urbanization: Assessment and affecting factors [J]. *Chinese Geographical Science*, 23(6): 729-739.
- Wang D L, Fang C L, Gao B Y, et al. 2011. Measurement and spatio-temporal distribution of urbanization development quality of urban agglomeration in China [J]. *Chinese Geographical Science*, 21(6): 695-707.
- Wang S J, Ma H T, Zhao Y B. 2014. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Ecological Indicators*, 45(5): 171-183.
- Wu X, Cui P. 2016. A study of the time-space evolution charac-

- teristics of urban-rural integration development in a mountainous area based on ESDA-GIS: The case of the Qinling-Daba Mountains in China[J]. Sustainability, 8(11): 1085.
- You H Y. 2016. Quantifying the coordinated degree of urbanization in Shanghai, China[J]. Quality & Quantity: International Journal of Methodology, 50(3): 1273-1283.
- Zhao J J, Chai L H. 2015. A novel approach for urbanization level evaluation based on information entropy principle: A case of Beijing[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 430: 114-125.

Spatial-temporal changes of population-economy-land-society-ecology coordination level of urbanization and clustering: A case of Guangdong Province, China

LI Jiufeng¹, YU Huafei¹, FU Yingchun^{1,2*}, ZHAO Yaolong^{1,2}

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Guangdong Provincial Center for Smart Land Research, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Multidimensional urbanization coordination evaluation is an important aspect for measuring the quality of urbanization of a region, and spatial-temporal clustering models are effective means for analyzing features of urbanization. Considering the lack of multidimensional comprehensive spatial-temporal analysis of urbanization coordination degree at present, this article takes Guangdong Province as an example and propose a complex spatial-temporal coordination degree evaluation model based on spatial-temporal weight matrix. This model is used to analyze the urbanization coordination level from 2006 to 2014, and the clustering is analyzed by the spatiotemporal scanning method. The results show that: (1) The coordination level of urbanization in recent years shows three kinds of temporal characteristics: the level of population urbanization shows the "concentrated" characteristics of development with time, while the economy and land show low frequency alternations of "concentrated and scattered" development, and social, ecological, and comprehensive level show a high frequency alternation of "concentrated and scattered" development. The spatial-temporal changes of each dimension and comprehensive system coordination degree show that the stable cities are mainly located in the core area of the Pearl River Delta. (2) The spatial-temporal clustering characteristics of each system are not only differentiated, but also overlapped. Western Guangdong Province forms a spatial-temporal cluster featuring coordination of population urbanization; the economic and land dimensions of the coordination of spatial-temporal clustering coincide in the Pearl River Delta and northern Guangdong; the social and ecological dimensions of coordination of spatial-temporal clustering cross in the Pearl River Delta and eastern Guangdong Province, and system coordination is centered. In addition, the stability of population, economic, and social dimensions in the spatial-temporal clusters is superior to that of land and ecological dimensions. The conclusion of this study is helpful for revealing the spatial-temporal characteristics of urbanization in the region.

Key words: urbanization coordination level; spatial-temporal changes; complex spatial-temporal system coordination degree evaluation model; spatial-temporal clustering model; Guangdong Province