

引用格式:洪建智,郭碧云,付迎春,等.新型城镇化的人地耦合异速增长分析方法[J].地球信息科学学报,2020,22(5):1049-1062. [Hong J Z, Guo B Y, Fu Y C, et al. Analytical method for man-land coupling allometric growth under the background of new-type urbanization[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(5):1049-1062.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190311

新型城镇化的人地耦合异速增长分析方法

洪建智¹, 郭碧云¹, 付迎春^{1,2*}, 聂欢¹

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

Analytical Method for Man-Land Coupling Allometric Growth under the Background of New-type Urbanization

HONG Jianzhi¹, GUO Biyun¹, FU Yingchun^{1,2*}, NIE Huan¹

1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Guangdong Provincial Center for Smart Land Research, Guangzhou 510631, China

Abstract: With the rapid development of urbanization in China, the complicated growth between population and land use in urban areas has attracted increasing attention. Under the background of new urbanization, studying the relative growth relationship between the urbanization levels of these two elements of different dimension is beneficial to exploring both the degree of coordination and the driving force of the man-land coupling development. In this paper, we calculate the index of man-land coupling urbanization to identify four types of coupling on the street (township) scale, which is based on the Landsat time series images, the census and yearbook data in Guangzhou from 2000 to 2015; To further quantify the degree of coupling and analyze their spatial pattern, we developed the allometric growth model fitting the annual average growth rate of man and urbanized land for the four categories, including increasing and decreasing ratio of man and land, increasing ratio of man and decreasing ratio of land, decreasing ratio of man and increasing ratio of land. The new model can delineate the more significant allometric growth for the street (township) units of the different categories than that analysis for the whole area. The main results are as follows: (1) From 2000 to 2015, the coupling development population and land urbanization on the street (township) scale in Guangzhou shows obvious characteristics of three-tier spatial structure. The allometric growth models of four types of man-land coupling show three kinds of equations, including positive allometric, negative allometric and negative power-law, which proves that the classification of allometric growth is helpful to analyze the dynamics co-evolution of man-land urbanization; (2) The allometric growth patterns of the Guangzhou's circle structure reveal the man-land coupling's harmonious situation of urbanization. The core circle, inner circle and outer circle respectively presents the development of compact, intensive expansion, and extensive expansion. In addition, through the

收稿日期:2019-06-18;修回日期:2019-11-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(41871292);武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室珞珈一号特别开放研究基金资助课题(T1805);广州市科技计划项目(201802030008)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41871292; Open Research Fund of State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, No.T1805; Science and Technology Program of Guangzhou, No.201802030008.]

作者简介:洪建智(1998—),男,广东梅县人,本科生,主要从事地理信息科学研究。E-mail: hongjianzhi@qq.com

*通讯作者:付迎春(1976—),女,云南武定人,博士,教授,硕导,主要从事定量遥感、时空分析与社会地理计算研究。

E-mail: fuyc@snu.edu.cn

joint spatial analysis with the renovation and transformation in old urban areas, it indicates that the development of urban renewal has certain positive effects in Guangzhou. The core and inner circle have formed the harmonious growth development trend preliminarily. Nevertheless, the outer circle is obviously developing towards the accelerated expansion of population and land during the late period, which needs to be paid more attention to preventing the phenomenon that the suburbanization of the outer circle is transformed into extensive growth. To conclude, the research results can provide support for both the cognitive exploration of the new urbanization theory connotation and the empirical research of the Guangzhou case.

Key words: new-type urbanization; street(township) scale; man-land coupling; population urbanization; land urbanization; allometric growth; allometric scale; coordination; Guangzhou

***Corresponding author:** FU Yingchun, E-mail: fuyc@m.scnu.edu.cn

摘要:在新型城镇化背景下的城市人口规模与用地面积变化具有复杂性,研究两种要素城镇化水平的相对增长关系,有助于探索人地耦合发展的协同态势及变化动因。本文选取广州市2000—2015年的Landsat时序影像与2000、2010和2015年的人口普查与年鉴数据,在街道(乡镇)尺度上计算人口土地城镇化耦合指数识别4种耦合类型,并在此基础上提出年均增长率异速关系拟合方法。研究结果表明:①2000—2015年广州市街道(乡镇)人口和土地城镇化呈现明显的圈层结构(核心、内、外圈层)特征,4种人地耦合类型的异速增长分别呈现正异速、负异速、负幂律3种形式,证明人地耦合分类的异速增长建模方法有助于分析人地城镇化的动态演化过程;②基于人地耦合指数的异速标度分析表明,核心圈层—内圈层—外圈层结构上分别形成了高度集约—集约—相对粗放式扩张的发展格局,结合城市更新改造的空间分析,说明这一特色新型城镇化模式在广州具有一定成效,已初步形成了核心圈层与内圈层协同发展的态势,但需要注意防控外圈层的粗放型增长。研究结果可为新型城镇化理论内涵的认知探索和广州市案例的实证研究提供支持。

关键词:新型城镇化;街道(乡镇)尺度;人地耦合;人口城镇化;土地城镇化;异速增长;异速标度;协同演化;广州市

1 引言

城镇化是经济社会发展的必然趋势和现代化的必由之路。国家“九五”规划以来的快速城市化,导致了人口城镇化率虚高、土地城镇化无序扩张乃至失控等现象的出现。2014年3月颁布的《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》^[1]明确提出要走中国特色的“新型城镇化”道路,城市空间发展模式由外延扩张向内涵转变——通过人口、经济、社会、土地各要素的协同发展,来解决农业人口城市化进程滞后和建设用地粗放低效之间的主要矛盾,实现面向“人的城镇化”和“城镇化城乡综合过程与协同发展”的转变^[2-5]。因此,新型城镇化的核心内容涉及各要素的城镇化协同关系。理解新型城镇化的内涵、特征、影响因素等重要部分,对于研究新型城镇化的发展、城镇体系的空间结构及其时空演化,具有理论和实践上的双重意义^[6-7]。

当前,既有的城镇化研究基于土地、人口、产业等多种指标因素,综合探究了全国和区域尺度的城镇化发展现状与发展模式差异,包括城镇化的内生过程^[8]、耦合协调发展特征^[9-10]、地域特点和驱动要素^[11]等,其中,要素耦合协调程度是城镇化多要素

综合分析的关键点。同时,城市化演化模型也经历了通过数量统计、分形理论和复杂性科学方法量化增长水平、时空形态与动力机制的过程,产生了包括Logistic、CA与多智能体模拟、系统动力学模拟结合等模型^[12-17],并且以上模型主要面向城市向外粗放扩张发展方式的研究^[15]。相比于既有研究中主要权衡城市间人口、土地、经济、社会多种要素的城市化水平,新型城镇化研究开始转向要素间的协同态势及其对城市化的影响方式^[18],包括从空间上通过城市内部的旧城改造更新、城乡融合、创新驱动等主要手段^[16],实现新型城镇化对冒进态势的遏制。

此外,城市的无尺度性和复杂性特征使得城镇体系研究适合在分形、异速增长等理论上开展异速标度分析^[19],并逐步集成到城市分析的新理论中^[20-21]。由于人口和土地分别属于不同维度的要素变量,故需要引入异速增长模型进一步衡量其城镇化水平的相对速率关系和测度分形格局。异速增长定律最早源于生物学,后由Naroll等^[22]、Lee等^[23]将其引入城市地理学研究中,用于描述任一城市与整体的相对增长关系或者城市内部不同要素之间的相对增长比率。相关学者将异速增长定律应用于各国城市化^[24]、城市间水平^[25-26]、京津冀城市群形

态^[27]等对比中。综述以上,相关研究偏宏观,以数值模拟、驱动成因分析和基于横向异速分析的城市发展形态为主要内容,较少关注微观时空尺度的要素变化及其间协同态势的演化。但是,关注单一城市的多要素之间的关系,是具有研究价值的。陈彦光^[28]基于统计数据研究河南省信阳市的人口用地的异速关系,并指出标度异常的原因是大量的“造城运动”。新型城镇化的背景要求城镇化过程中的多要素应保持相适应和匹配的速度演进,以促进城镇化综合协同发展^[27]。因此,在城乡街道(乡镇)尺度上开展要素耦合协同分析,有助于考查城乡内部的城镇化水平时空差异与发展趋势,探讨人地耦合变化动因,丰富和补充新型城镇化的理论认知和研究方法手段。

基于此,本文选取广州市作为案例地。根据广州市2000—2010年2个五年计划的调整政策与2015年十三五的城市优化改造方案,本文拟分析街道(乡镇)尺度人口—土地城镇化水平的时空变化,构建人地耦合变化类型下的城市异速增长模型,进一步揭示人地协同的速度、幅度和时空格局。通过分析广州市街道尺度的人口—城市面积异速关系的案例,本次的研究价值体现在以下几个方面:①为国内更新改造背景下的城市异速增长理论研究提供参考;②有助于对新型城镇化理论内涵中的多要素协同发展等关键特征的理解;③尤为重要的是,相较于传统异速增长模型基于单年的城市统计数据拟合,本文提出了基于城镇化多要素的年均变化率探索异速标度分析的新思路,为异速增长理论提供新方法。

2 研究区概况、数据来源及预处理

2.1 研究区概况

广州市作为改革开放前沿的排头兵,早在2010年以前就致力于建成国际化大都市,其后更是提出了建设枢纽型网络城市的升级发展战略^[29]。2000年广州市实施了“东进、西联、南拓、北优”总体发展战略规划,将周边的花都、增城、黄埔和萝岗改市为区,扩大了广州城区的范围;2006年开始的城市内部优化改造的“中调”战略,和随后在2016年提倡的“微改造”,推动了城市存量空间的盘活再利用和再生开发——先后经历了109.2万m²的危房改造、三旧改造及大规模(30%)低效建设用地提

升3个阶段^[30]。在更新开发中,旧村和旧城改建使各街道(乡镇)单元发生了较大的城镇建设用地和人口变化^[31],相关学者探讨了广州街道(乡镇)尺度上的人口密度郊区化现象^[32]。相关研究虽然对特定区域或特定阶段的城镇化格局特征分析与机制剖析取得明显进展^[33],但对新型城镇化背景下城镇人口和城镇建设用地增减变化的影响分析尚少有报道。

结合图1所示的研究区广州市,采用相关学者根据人口密度分布确定的核心与内外圈层结构^[32],对2000—2010年、2010—2015年2个时段的街道(乡镇)进行人口和土地城镇化水平相对增长速度的关系分析。根据2005年区划调整,将越秀、荔湾、天河、白云、花都、海珠、番禺、南沙、黄埔、萝岗10区和从化、增城的街道(乡镇)作为研究对象,并且按照2015年街道(乡镇)分布矢量数据进行合并调整,数量最终统一为165个,在剔除掉其中3个非人口要素承载区域(林场、水库等)后,实际用于本次研究的街道(乡镇)数量为162个,其中街道128个,乡镇34个。

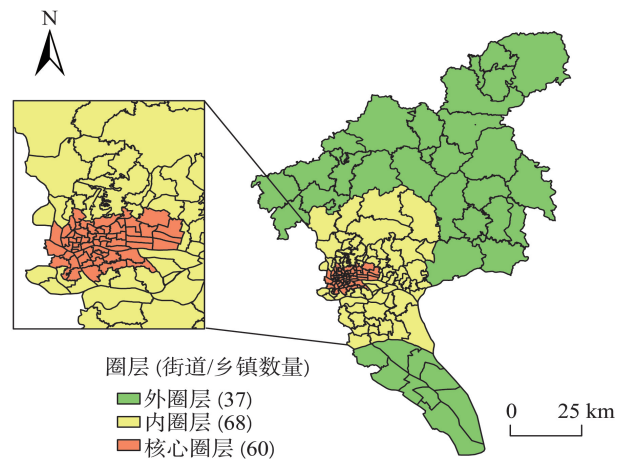


图1 2000—2015年广州市圈层结构分布
Fig. 1 Three-tier spatial structure in Guangzhou from 2000 to 2015

2.2 数据来源及预处理

本文涉及的数据包括广州市各街道(乡镇)2000、2010、2015年的农业与非农业人口数据和城镇建设用地面积数据,数据来源详见表1。

根据广州城市发展战略和人口落户政策,在街道(乡镇)尺度上开展人口研究,应考虑到农村的农业人口比例,通过区分农业人口与非农业人口,以获得与街道(乡镇)尺度上的城镇建设用地(即城市、乡镇镇区用地)对应的一致性。同时,在2014年7

表1 数据来源说明

Tab. 1 The explanation of data source

数据名称	数据来源
2000、2010、2015年广州市各街道(乡镇)农业人口和非农业人口数据	第五次 ^[34-35] 、第六次 ^[36] 全国人口普查和2015年广州各区统计年鉴 ^[37-46]
2000、2010、2015年广州市各街道(乡镇)城镇建设用地区域面积数据	基于Landsat影像的30 m连续变化检测分类数据集(Continuous Change Detection and Classification, CCDC) ^[51-52]

月国家推行户籍制度改革以前,第五次^[34-35]、第六次^[36]全国人口普查与2015广州各区统计年鉴^[37-46]提供了农业与非农业人口统计数据。鉴于数据可得性等因素,本文采用非农业人口代替城镇人口,其与常住人口数据的比例反映街道(乡镇)的人口城镇化水平,相应地,采用城镇建设用地区域面积与土地总面积的比例反映街道(乡镇)的土地城镇化水平。

已有研究应用30 m空间分辨率的Landsat遥感影像数据对城市进行了不同尺度(从不同级别的行政区划^[47-48]到像素格网多尺度^[49])的多种土地利用类型(林地、草地、耕地、建设用地、水体等)提取,并基于分类数据和其他数据,对城市暴雨防治、城市生态空间^[49-50]等进行研究。针对广州市近年来城市更新和“中调”策略导致的城市内部显著变化,本文前期研究工作基于Landsat数据集的CCDC(Continuous Change Detection and Classification)算法进行去云检测和连续变化检测与分类^[51-52],开展了广州市土地利用覆被共14个类的精细分类和验证工作,涵盖有林地、农田、灌丛、果园等非建设用地与农村居民点用地、中高密度居住区、商业、工业等城镇建设用地。经验证,建设用地分类精度达92.9%^[53]。对比逐年非建设用地与建设用地分类数据的集合,发现存在一部分建设用地转化为非建设用地(水体、果园、农田)的现象,农田与水体面积分别增加了2.06%和1.37%^[53]。城市用地变化与研究期内实施的城市更新发展政策有关。

在此数据基础上,分别统计广州各圈层上的街

道(乡镇)的城镇人口和城镇建设用地区域面积变化量(表2)。其中,2000—2010年人口年均增长率最高的是核心层,2010—2015年最高的则是外圈层,已有研究表明城市外圈层的人口与土地空间结构变化最大,过渡性、复杂性、动态性是其重要特征^[54]。相应地,城镇建设用地区域的年均增长率在2000—2010年和2010—2015年分别是内圈层和外圈层达到最大,核心圈层则表现为缓慢增长和减少的趋势,这主要与主城区的城市更新改造有关,图2(a)和图2(b)提供了城镇建设用地扩展和减少的改造案例。

3 研究方法

3.1 技术路线

如上所述,针对广州市城镇化发展策略的调整,为探明其所带来的人口土地城镇化演化的协同特征,本文拟构建街道(乡镇)尺度上的城镇人口和城镇建设用地区域面积耦合异速增长模型,分析广州在2000—2010年(前一时段)和2010—2015年(后一时段)的城镇化增长空间格局及空间分异,技术路线见图3。

3.2 人口土地城镇化耦合发展指数

根据吴一凡等^[31]的研究,人口城镇化与土地城镇化年均增长率的比值,具有指示人口—土地耦合态势及空间格局的意义,见式(1)。

表2 2000—2015年广州市城镇人口数量与城镇建设用地区域面积变化情况

Tab. 2 The change of urban population and built-up areas in Guangzhou from 2000 to 2015

时段	圈层	城镇人口数量			城镇建设用地区域面积		
		增长量/万人	增长率/%	年均增长率/%	增长量/km ²	增长率/%	年均增长率/%
2000—2010	核心层	34.34	17.51	1.63	1.24	0.99	0.10
	内圈层	26.30	14.57	1.37	74.09	11.96	1.14
	外圈层	23.27	12.67	1.20	25.16	3.55	0.35
2010—2015	核心层	36.17	12.47	2.38	-4.07	-3.23	-0.82
	内圈层	26.93	13.87	2.63	23.05	3.32	0.82
	外圈层	25.71	25.15	4.59	47.87	6.53	1.59

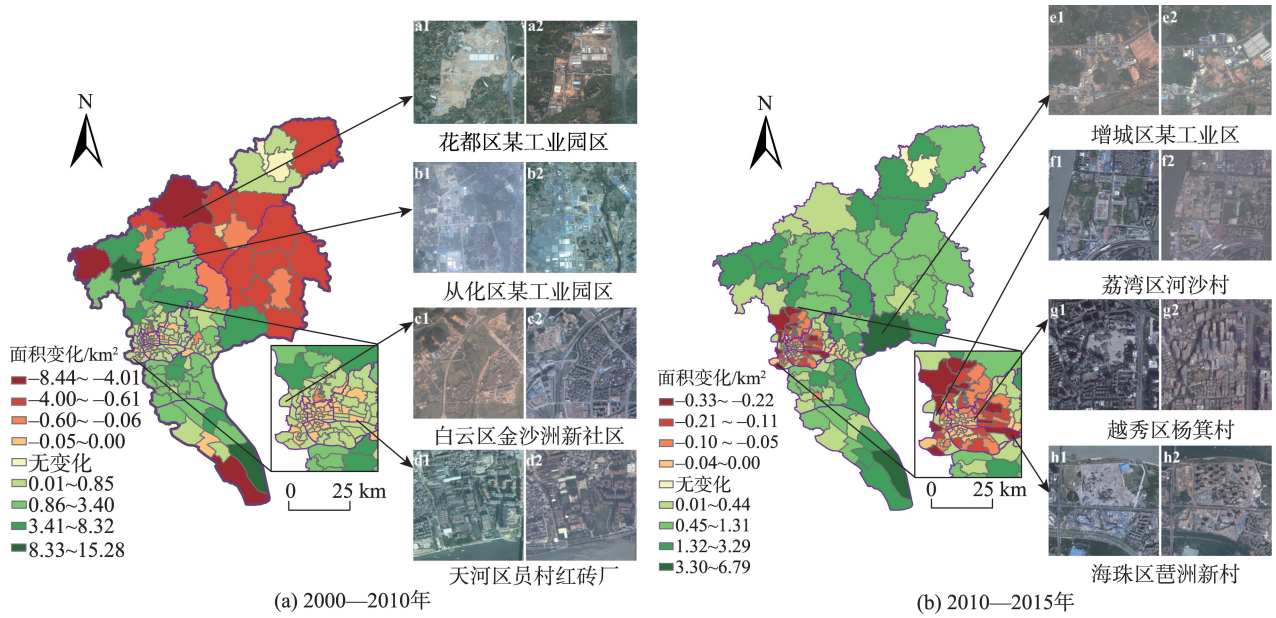


图2 2000—2015年广州市城镇建设用地面积变化
 Fig. 2 Changes of built-up areas in Guangzhou from 2000 to 2015

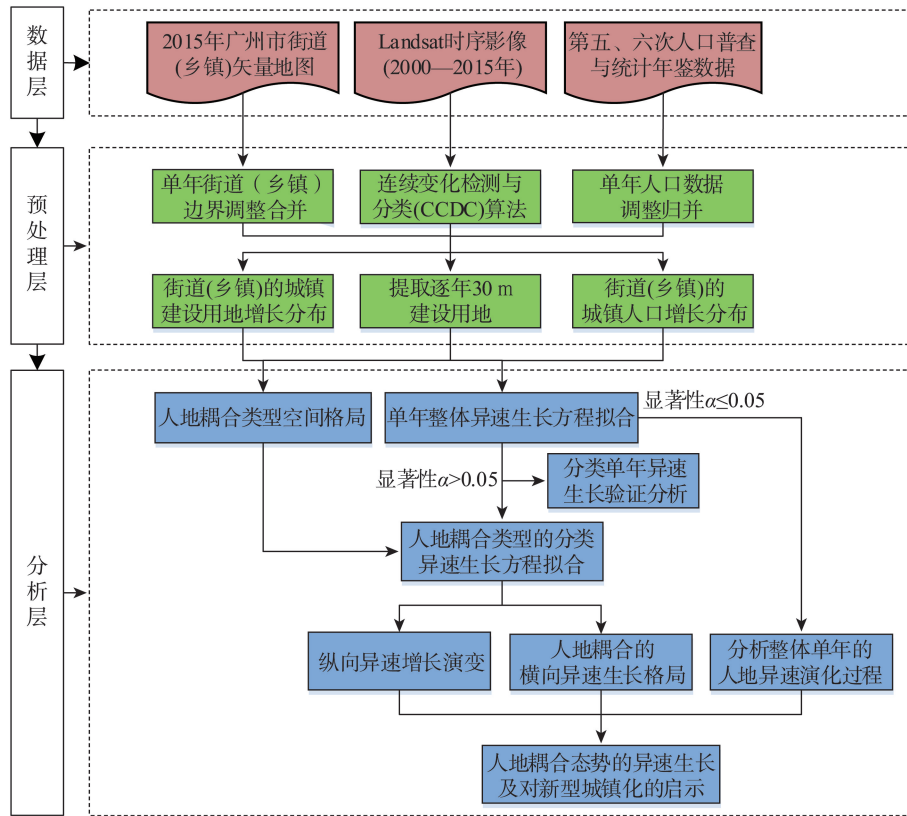


图3 基于人地耦合类型的异速增长分析流程
 Fig. 3 Allometric growth analysis process based on man-land coupling types

$$\alpha = DR/LR \quad (1)$$

式中： α 是人口与土地城镇化的耦合发展关系指数； DR 和 LR 分别指研究期内人口和土地年均城镇化增长速度(增长率)。

首先,分别计算人口与土地城镇化率,人口城

镇化率由非农业人口与常住人口的比值表示,土地城镇化率由城镇建设用地面积与该街道(乡镇)单元土地总面积的比值表示;在此基础上分别计算人口与土地城镇化率的年均增长率。人口和土地城镇化耦合情况可根据 DR 与 LR 的增减变化和数值比较

划分为4种类型(图4)。如当 α 位于I区或III区时, DR 与 LR 均大于0或均小于0,表明人口城镇化与土地城镇化年均增长率同时增长或同时减少;当 α 位于II区或IV区时,则表明二者增长与减少并存。

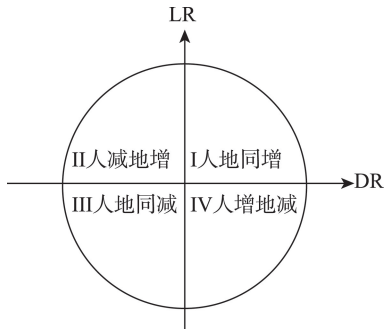


图4 人口与土地城镇化耦合类型

Fig. 4 Coupling types of population and land urbanization

3.3 异速增长模型

人地耦合类型是依据人口与土地2种要素的城镇化年均增长率之间的增减关系来说明其变化趋势,但是由于人口(2维)与土地(1.7维)分属2个不同维度的要素变量^[55],所以即便两者的城镇化年均增长率在数值上相同,也不能在相同的维度上说明其增长速率是一致的。因此本研究引入异速增长模型来分析两种要素的年均增长率的变化相对快慢,拟合出每种耦合类型的量化方程,使得不同维度的城市要素发展分析更具有科学性。

城市中的多维要素具有关联和邻近相关性等特征,当城市化进程没有受到内外异常因素干扰时,城市中的两个要素 x 和 y 变化在一定时段 t 内会服从幂指数方程,即要素相互影响关系式(2)。

$$\frac{dy}{ydt} = b \frac{dx}{xdt} \quad (2)$$

对式(2)进行简单的积分变换,可得到幂指数函数形式^[55],即有:

$$y = Kx^b \quad (3)$$

式中: x 为系统的某个局部或整体的测度; y 为系统的另一个局部或整体的测度; α 为异速(增长)系数(Allometric Coefficient),亦即后面所谓的标度因子 b (Scaling Factor), K 或 a 为比例系数(Proportionality Coefficient)。从式(3)容易看出, b 反映的是 y 的相对增长速度与 x 的相对增长速度的比率。结合人口、土地、规模等级的城市化过程,城市人口—土地的异速增长可具体化为3类典型应用^[55]。

$$A(r) = aP(r)^b \quad (4)$$

$$A(t) = aP(t)^b \quad (5)$$

$$A(k) = aP(k)^b \quad (6)$$

式中: r 表示城市半径; t 表示时间维度; k 表示城市位序(rank)或者等级(order)。式(4)—式(6)分别代表一定的半径范围 r 、演化时段 t 和等级 k 的城市人口与建设用地的异速增长关系。

城市人口规模与城区用地面积之间的标度关系(b)代表了一种城市人地关系,该关系隐含着城市演化的空间动力学^[28]。城市人口—土地的幂指数具有广义分形的维数概念。相关学者通过引进分形维度来讨论,大量城市或者城市体系维数处于 $2/3 \sim 1$ 之间,约为0.85,陈彦光等^[55]也探讨证明了0.85作为阈值的合理性,当 $b > 0.85$ 时,说明该城市的相对增长率大于城市系统整体,为正异速增长; $b < 0.85$ 时,为负异速增长; $b = 0.85$ 时,为同速增长。而当幂指数函数模型退化为线性模型时,说明城市化发展受到干扰,不遵守自然分形的标度定律特征,某些变量或者系统的要素增长达到饱和或者受到约束。

现实中的城市异速增长关系可能局部退化,但只要时间序列的拟合曲线为增函数曲线即可满足建立异速增长方程的要求。根据广义分形维度,异速增长方程可以导出正、负幂律和双线性方程^[55]。本文考察的新型城镇化背景下的城市更新再发展模式,虽然在一定时段内会出现街道(乡镇)城镇人口和城镇建设用地面积缩减和倒退的现象,但长期总体上是符合城镇发展趋势的。因此,本文对街道(乡镇)的人口和土地的城镇化水平,按式(3)构建年均增长率的纵向异速关系方程,具体见式(7),以探讨二者耦合的演化速率关系。由于既有研究多使用单年人口数量和建设用地面积来构建单年的异速增长方程,故本文也将对比单年份的异速增长研究来验证年均增长率的纵向异速关系。

$$LR = K \times (DR)^b \quad (7)$$

式中: LR 表示土地城镇化水平; DR 表示人口城镇化水平。

4 结果及分析

4.1 人口土地城镇化的耦合特征

图5和图6分别为人地城镇化耦合类型的数量统计和空间分布情况。其中,2000—2010年发生变化的街道(乡镇)数目共有159个,2010—2015年则是所有街道(乡镇)(162个)都发生了变化。从图5所示的数量结构上看,前一时段中“人地同增”和

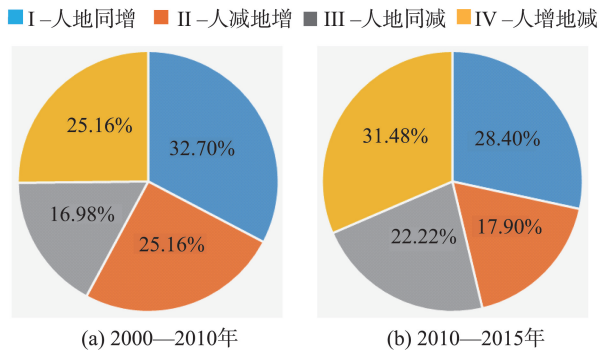


图5 2000—2015年广州市人口与土地城镇化耦合类型的数量统计

Fig. 5 Statistics on the coupling types of population and land urbanization in Guangzhou from 2000 to 2015

“人减地增”的街道(乡镇)占据优势,后一阶段这两类占比分别下降了4.30%与7.26%;而“人增地减”和“人地同减”的街道(乡镇)占比呈现上升趋势,分别上升了6.32%与5.24%。如图6(a)和图6(b)所示,从空间分布上看,两个时段的人地耦合类型呈现出明显的圈层结构。2000—2010年,主城区核心圈层主要呈现“人增地减”特征,内圈层和外圈层分别呈现“人地同增”和“人地同减”的主要特征;2010—2015年,主城区核心圈层依然保持“人增地减”的主要特征,内圈层主要呈现“人地同增”特征,

同时外圈层也呈现较大面积的“人地同增”分布特征。在4种类型中,“人增地减”表明人口城镇化为正向增长而土地城镇化为负向增长,指示出明确的集约性。然而,仅从城镇人口与城镇建设用地面积的增减相对值,并不能从实质上反映这两种要素间的协同关系,也不能进行耦合类型间的直接比较。人口与土地这两种不同维度的要素,其间的耦合关系需要从分数维的角度去评析,因此本文将在耦合类型的辅助下进一步开展异速增长分析。

4.2 人地耦合类型的异速标度特征分析

既有研究通常应用单年的人地统计数据开展横向异速增长拟合和标度分析。本研究先对2000、2010、2015年的街道(乡镇)城镇人口与城镇建设用地2种要素开展整体建模分析对比。图7中的异速增长拟合结果呈现为2000年和2010年的负异速方程与2015年的负幂律方程,但是相关系数不高,说明整体上各要素变量所受约束不同而呈现不同的响应,因此,整体上没有呈现出显著的异速关系,需要考虑不同的人地耦合特征的影响。

鉴于此,本文进一步考虑街道(乡镇)尺度上人口与土地城镇化增长率,应用连续变化数据进行纵向异速分析。同样取0.85作为标度系数的阈值,标度因子 b 小于该值时为负异速,说明城镇人口增长

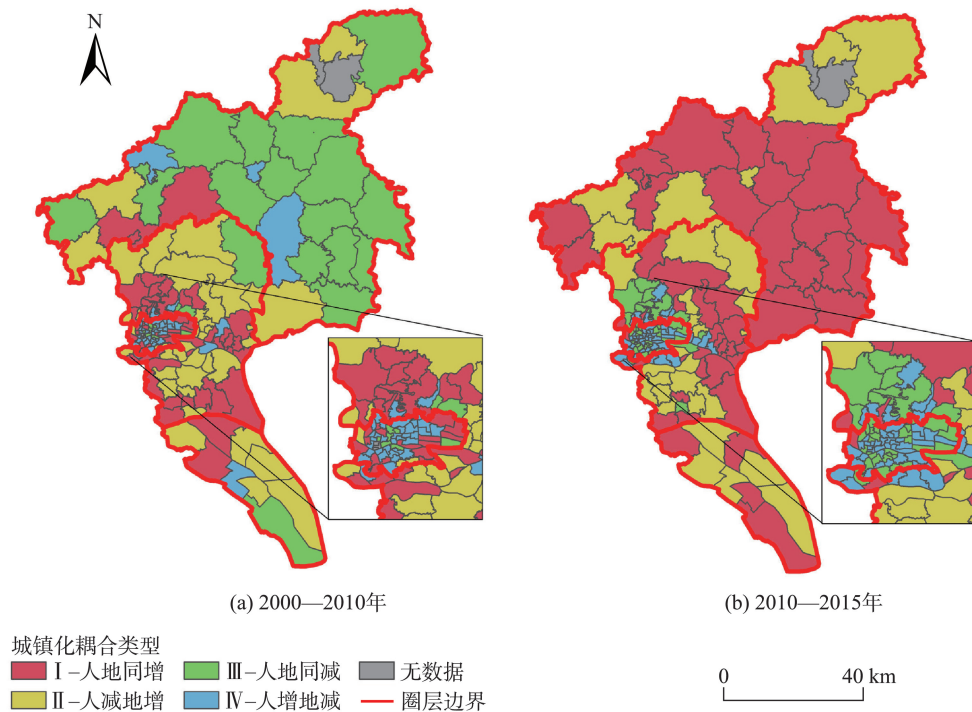


图6 2000—2015年广州市人口与土地城镇化耦合类型的空间分布

Fig. 6 Spatial pattern of the coupling types of population and land urbanization in Guangzhou from 2000 to 2015

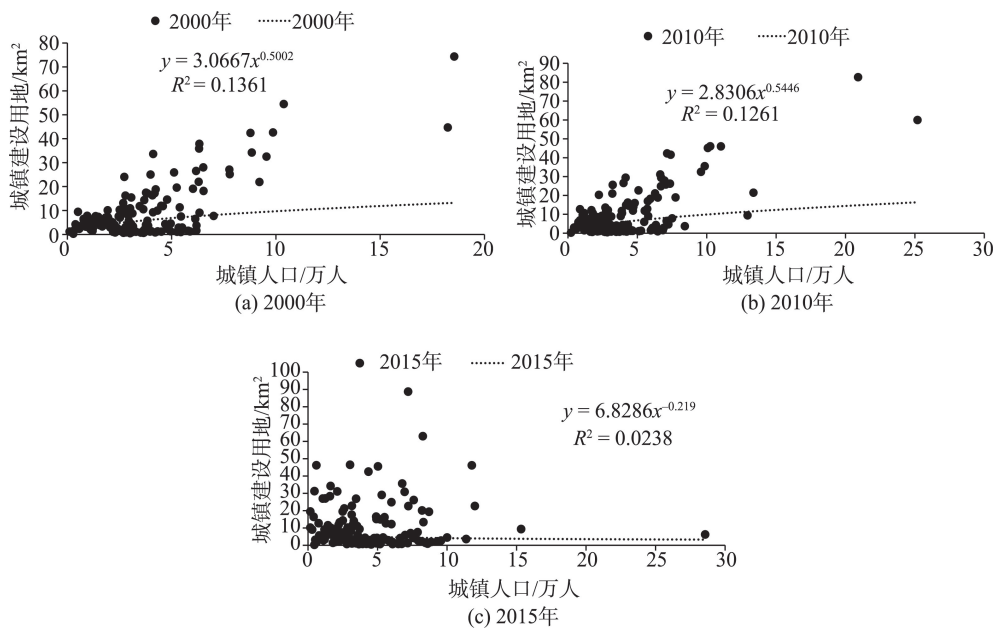


图7 2000、2010和2015年广州市城镇人口与土地整体异速增长拟合

Fig. 7 Fitting of the allometric growth of urban population and land in Guangzhou in 2000, 2010 and 2015

速率大于城镇建设用地面积增长速率;当 b 大于该值时为正异速,说明城镇人口增长速率小于城镇建设用地面积增长速率;接近0.85时说明两者的增长速率相当;当 b 值小于0并呈现为负幂律模型,则是正幂函数向负幂函数合理的转化形式^[55]。因此,本文对街道(乡镇)尺度上“人地同增”、“人增地减”、“人减地增”、“人地同减”4种耦合类型开展异速增长分析。两个时段的异速增长模型参数载于表3与表4,所有异速模型拟合均通过95%的显著性水平检验。其中,同一耦合类型也分别呈现出2种不同的异速增长特征。2000—2010年,“人地同增”部分

街道(乡镇)的标度因子 b 为负值(-0.559),呈负幂律分布;“人减地增”有部分街道(乡镇)标度因子大于0.85,属于正异速增长;其余拟合结果均属于负异速增长。而2010—2015年,所有街道(乡镇)的标度因子均小于0.85,属于负异速和负幂律增长。总体上街道(乡镇)尺度的人口土地城镇化呈现了正异速、负异速和负幂律3类方程。同时,为了验证2个时段的增长率模型,本文还对比分析了2000、2010、2015年的异速增长方程的标度因子 b ,证明本文基于年均增长率的异速标度和单年的异速标度因子增减指示意义相符合,支持本研究对2种要素

表3 2000—2010年广州市人口与土地城镇化各耦合类型的异速增长拟合

Tab. 3 Allometric growth of coupling types of population and land urbanization in Guangzhou from 2000 to 2010

人口土地城镇化耦合类型	异速增长类型	异速增长方程编码	标度因子 b	拟合优度 R^2	解释意义
01 人地同增	负异速	0101	0.2878	0.7466**	城镇人口增速快于城镇建设用地增速
	负幂律	0102	-0.5590	0.6848**	城镇人口增速增强,城镇建设用地增速放缓
02 人增地减	负异速	0201	0.5522	0.8707**	城镇人口增速快于城镇建设用地减速
	负异速	0202	0.7947	0.6224**	城镇人口增速快于城镇建设用地减速
03 人减地增	负异速	0301	0.5488	0.5759**	城镇人口减速快于城镇建设用地增速
	正异速	0302	1.1234	0.5711**	城镇人口减速慢于城镇建设用地增速
04 人地同减	负异速	0401	0.5693	0.3473**	城镇人口减速快于城镇建设用地减速

注:** $P < 0.01$ 显著性。

表4 2010—2015年广州市人口与土地城镇化各耦合类型的异速增长拟合

Tab. 4 Allometric growth of coupling types of population and land urbanization in Guangzhou from 2010 to 2015

人口土地城镇化耦合类型	异速增长类型	异速增长方程编码	标度因子 <i>b</i>	拟合优度R ²	解释意义
01 人地同增	负异速	0101	0.4096	0.3768*	城镇人口增速快于城镇建设用地增速
	负异速	0102	0.6949	0.4771**	城镇人口增速快于城镇建设用地增速
02 人增地减	负幂律	0201	-0.3020	0.3351*	城镇人口增速增强, 城镇建设用地减速放缓
	负幂律	0202	-0.3850	0.5009**	城镇人口增速增强, 城镇建设用地减速放缓
03 人减地增	负异速	0301	0.6807	0.8133**	城镇人口减速快于城镇建设用地增速
	负幂律	0302	-0.4270	0.4612*	城镇人口减速增强, 城镇建设用地增速放缓
04 人地同减	负幂律	0401	-0.3830	0.6174**	城镇人口减速增强, 城镇建设用地减速放缓
	负异速	0402	0.5155	0.3782*	城镇人口减速快于城镇建设用地减速

注: **P*<0.05 显著性, ***P*<0.01 显著性

耦合变化关系的解读,有助于进一步探索街道(乡镇)尺度上的城镇化差异及演化分析。

图8和图9中的异速增长拟合曲线主要呈现正幂律和负幂律2种形式,尽管2种类型在X、Y轴维度上都有交叠,本研究中区分人地耦合类型实现了较好的异速拟合效果。各类型的不同增长拟合曲线揭示:同一种人地耦合态势具有不同的

城镇化响应特征,而不同耦合态势的街道(乡镇)也具有相同的发展趋势。从异速标度演化分析来看,前一时段中“人减地增”的正异速增长街道(乡镇)单元,主要集中在内圈层即近郊区,明确指向了土地增长的速度快于人口减少的速度,呈现土地粗放扩展特点,如图10(a);经后一阶段发展已经排除了这种不合理扩张的情况,全部呈现负异速和负幂

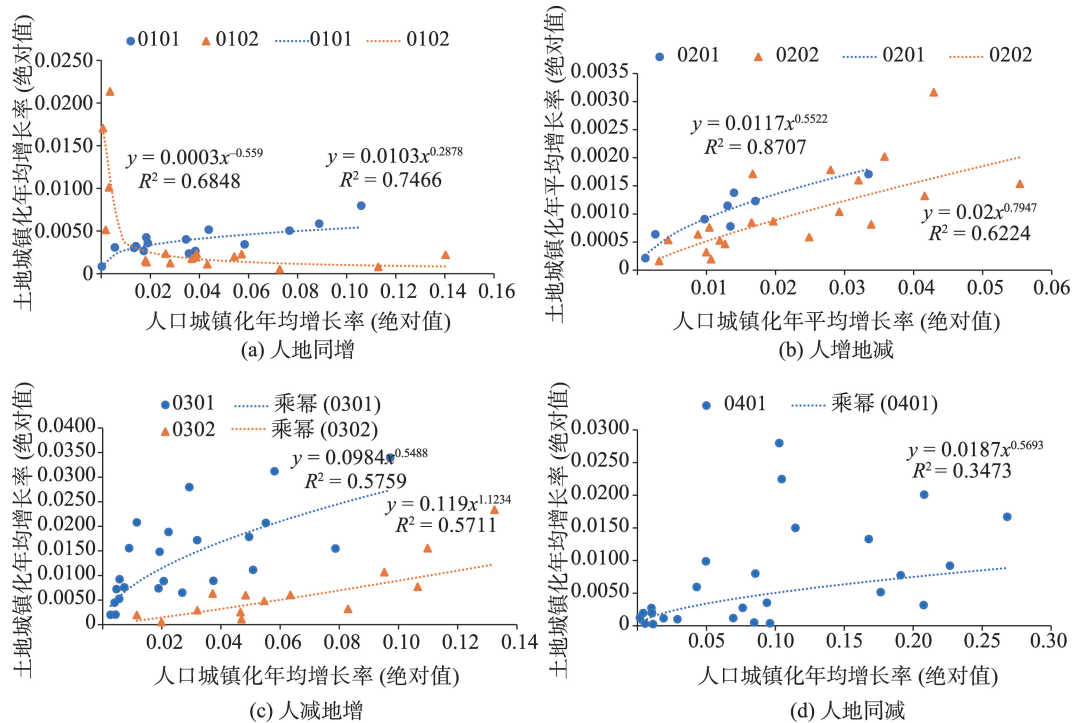


图8 2000—2010年广州市不同耦合类型的异速增长拟合

Fig. 8 Allometric growth of coupling types of population and land urbanization in Guangzhou from 2000 to 2010

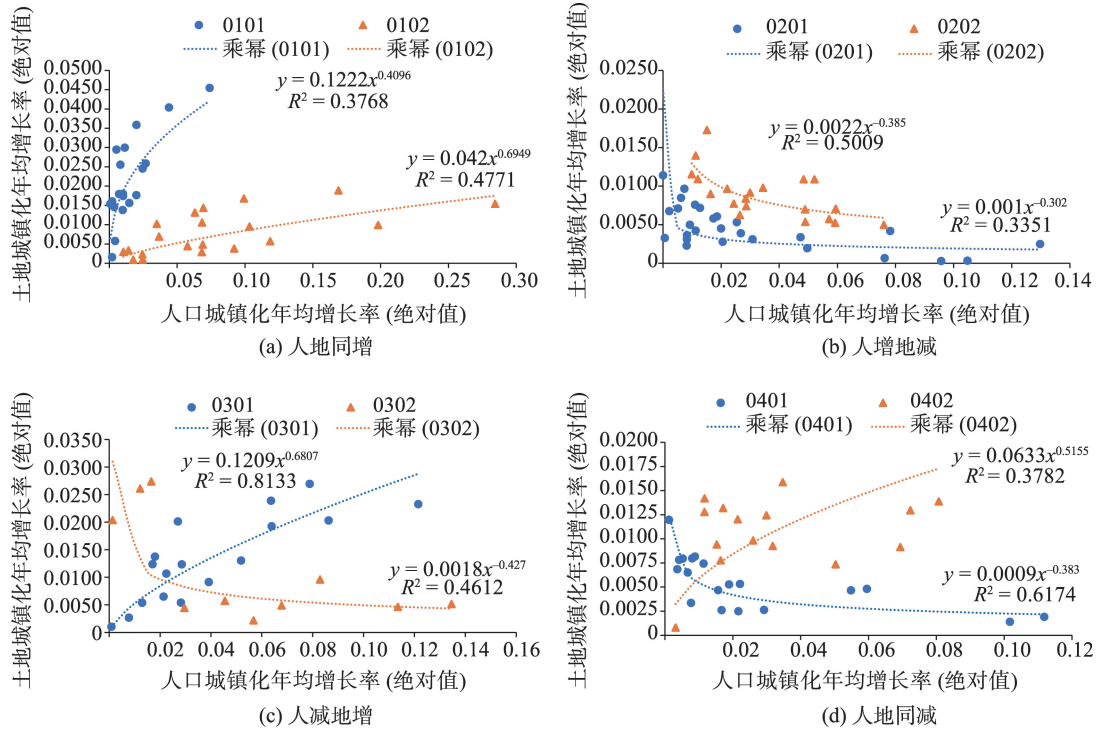


图9 2010—2015年广州市不同耦合类型的异速增长拟合

Fig. 9 Allometric growth of population and land urbanization in Guangzhou from 2010 to 2015

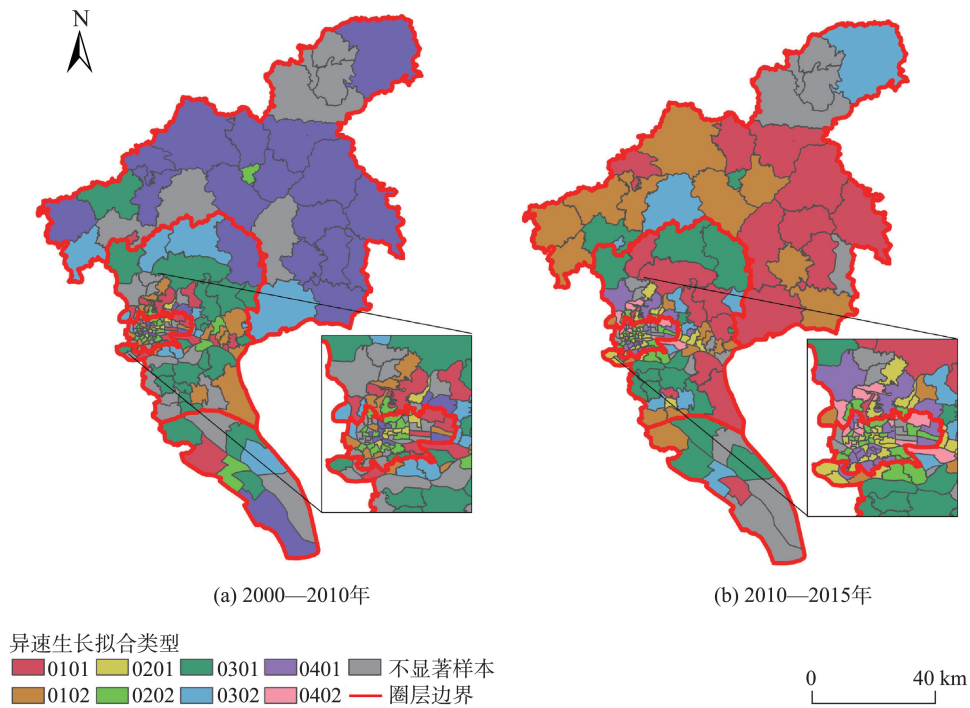


图10 2000—2015年广州市人口与土地城镇化协同发展的空间分布

Fig. 10 Spatial pattern of allometric growth of population and land urbanization in Guangzhou from 2000 to 2015

律的集约化发展趋势,如图10(b)。

4.3 广州街道(乡镇)的人地城镇化协同过程与格局

从异速增长的空间分布特征(图10)来看,

2000—2010年的正异速增长(0302)主要分布于白云区、增城区、花都区、南沙区,负异速增长集中在核心圈层的中心城区等。2010—2015年,所有街道(乡镇)拟合均为负异速增长,其中的负幂指数一负

异速增长主要分布于中心城区,并具有从中心向外空间扩展的规律。根据正负异速分别指示的粗放和集约发展特征,两时段的异速标度数值变化也可以说明集约程度高低的变化。结合城镇建设用地面积和城镇人口变化可知,在城市新开发区城镇化的起始阶段,城镇建设用地扩张快影响较大,人口—土地城镇化异速增长关系适合用正异速方程表示;而负异速增长关系较为普遍地分布在核心圈层之外的地方,是因为这些地方的人口与土地变化速率相匹配,是新开发区城镇化的第二阶段;在基础设施完善的城市核心区或城镇化的后期,城市人口大量集聚和城镇建设用地面积的微变化,使得两者异速增长关系主要呈现为负幂律方程的形式。因此街道(乡镇)尺度上形成了空间分异的格局,使得前文图7所示对整体的异速增长拟合未能通过显著检验。本文对人地耦合的4个类型进行分类拟合,构建了增长速率的纵向异速拟合方程,体现了街道(乡镇)尺度上人地耦合的空间分异与演化规律。

图10中,核心圈层中心红色显示的“人地同增”向紫色和粉色的“人地同减”转变,前一阶段同增转向后一阶段的同减,同时实现了协同发展与土地利用集约化,这些街道(乡镇)主要属于越秀、荔湾老城区,说明了城市更新中全面改造与微改造相结合的方式对促进城镇化要素协同发展的推动作用。对核心圈层的边缘区分析发现,以2种转变为主——“人减地增”的正异速与负异速向着“人地同增”的负异速增长变化,标度因子主要由0.5488上升为0.6949,虽然不如核心层集约程度高,但也体现了协同发展趋势;此外,内圈层的变化呈现以“人减地增”向“人地同增”转变,其标度因子由1.1234下降为0.4096,同理说明协同和土地集约程度的提高;外圈层部分呈现的变化主要是“人地同减”向“人地同增”变化,虽然二者协同增长,但标度因子由图8(d)的0.5693上升到图9(a)的0.6949,说明后一阶段外圈层主要呈现城镇建设用地的面积的高速扩张,需要注意调控以防止外圈层发生粗放型方式增长。

基于图8和图9的异速增长拟合方程,图10得出了2个阶段的人地耦合的异速增长分布,对比广州市圈层结构上的变化,总体上,核心层和内圈层呈现了协同集约发展的趋势和格局,而外圈层有着“人地同增”的相对粗放的不协同发展态势。如引言所述,新型城镇化人地协同指城镇化中人地要素应保持相适应和匹配的速度演进,本文研究在人地

耦合基础上进一步量化异速增长率的相对比例关系,并结合异速标度指示人地协同发展水平,为深入分析广州要素间协同演进的圈层结构模式提供了参考。

5 讨论和结论

新型城镇化背景下,针对广州城市发展政策演变与近十年来的城村融合发展特征,本文构建了街道(乡镇)尺度的人口土地城镇化耦合指数辅助的异速增长模型。研究结果与相关学者的外圈层郊区化发展的结论契合^[9],一方面,外圈层的开发区建设和房地产开发建设形成拉力,如东部的广州开发区、北部的花都汽车产业园区、南部的大学城、生物岛;另一方面,核心圈层的“三旧改造”在提升城市品质的同时对部分人口形成推力,比如随着旧改规模扩大,“旧厂房”的改造导致工人大量流出,“城中村”的改造使得大量外来人口由于无法负担高成本的居住价格而迁往内圈层和外圈层;同时,核心圈层中“三旧改造”的公共空间和绿化设施缓解了快速的土地城镇化进程,进一步提升了人口城镇化的内涵式发展。内圈层土地城镇化增长率在前期偏高却在后期回落,外圈层土地城镇化增长率则在后期升高,呈现城市向郊区扩展的特征;为满足大量的人口迁入,2010—2015年时段的外圈层土地城镇化率明显提升。整体而言,广州市城镇化过程中,人口与土地两种要素的耦合协调关系是朝着良好的方向发展,说明该城市更新发展模式 and 策略适用于广州,这印证了特色新型城镇化发展道路的有效性。

本文研究结果可以总结为以下结论:2000—2015年广州市街道(乡镇)尺度上的人口和土地城镇化耦合发展指数呈现比较明显的时空演化特征。空间上呈现较明显的圈层结构,2000—2010年核心圈层—内圈层—外圈层分别呈现人增地减—人减地增—人地同减为主的耦合特征;2010—2015年则分别表现人增地减—人地同增—人地同增为主的耦合特征。结合两时段异速标度因子的变化,在核心圈—内圈层—外圈层分别呈现了高度集约—集约式扩张—相对粗放式扩张特征,有效地说明了城镇土地集约利用效率呈现向外扩展的趋势;最后,结合老城区城市更新改造及外围拉动发展,应肯定该政策在核心和内圈层上的协同发展成效,需要进一步

规划外圈层发展,同时需要抓住广州流动人口大、老旧建筑多、资源有限等特征,对症规划发展,以更好地实现协同的、人本的新型城镇化。当然,新型城镇化发展不只局限于土地与人口,还应考虑经济、社会、生态等多要素的耦合发展。在粤港澳大湾区国家战略推动下,未来工作将进一步考察广州市城镇化道路的多要素耦合协同发展,研究结果可以为其他大湾区核心城市如深圳、香港或其他城市群的研究提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 中共中央国务院.国家新型城镇化规划(2014-2020年)[R].北京:新华社,2014. [Central Committee of the Communist Party of China and the State Council. The National New-type Urbanization Plan (2014-2020)[R]. Beijing: Xinhua News Agency, 2014.]
- [2] 陆大道,陈明星.关于“国家新型城镇化规划(2014-2020)”编制大背景的几点认识[J].地理学报,2015,70(2):179-185. [Lu D D, Chen M X. Several viewpoints on the background of compiling the "National New Urbanization Planning (2014-2020)"[J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(2):179-185.]
- [3] 陈明星,龚颖华.城镇化系列咨询研究进展与影响.地理研究,2016,35(11):2015-2024. [Chen M X, Gong Y H. Research progress and influence of series of consulting reports of urbanization[J]. Geographical Research, 2016,35(11):2015-2024.]
- [4] 黄震方,陆林,苏勤,等.新型城镇化背景下的乡村旅游发展——理论反思与困境突破[J].地理研究,2015,34(8):1409-1421. [Huang Z F, Lu L, Su Q, et al. Research and development of rural tourism under the background of new urbanization: Theoretical reflection and breakthrough of predicament[J]. Geographical Research, 2015, 34(8):1409-1421.]
- [5] 陈明星,叶超,陆大道,等.中国特色新型城镇化理论内涵的认知与建构[J].地理学报,2019,74(4):633-647. [Chen M X, Ye C, Lu D D, et al. Cognition and construction of the theoretical connotation for new-type urbanization with Chinese characteristics[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(4):633-647.]
- [6] 张京祥,崔功豪.城市空间结构增长原理[J].人文地理,2000,15(2):15-18. [Zhang J X, Cui G H. Growth principles of urban spatial structure[J]. Human Geography, 2000,15(2):15-18.]
- [7] 陈彦光.城市形态的分维估算与分形判定[J].地理科学进展,2017,36(5):529-539. [Chen Y G. Approaches to estimating fractal dimension and identifying fractals of urban form[J]. Progress in Geography, 2017,36(5):529-539.]
- [8] 陈明星,陆大道,张华.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,2009,64(4):387-398. [Chen M X, Lu D D, Zhang H. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization[J]. Acta Geographica Sinica, 2009,64(4):387-398.]
- [9] Fang C L, Zhou C H, Gu C L, et al. A proposal for the theoretical analysis of the interactive coupled effects between urbanization and the eco-environment in mega-urban agglomerations[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017,27(12):1413-1449.
- [10] 袁方成,陈泽华.迈向均衡发展的新型城镇化——一个“人口—土地—财政”要素耦合协调模型的分析[J].华中师范大学学报(人文社会科学版),2018,57(3):1-16. [Yuan F C, Chen Z H. New urbanization towards balanced development: An analysis of coupling coordination model of "Population- Land- Finance"[J]. Journal of Central China Normal University (Humanities and Social Sciences), 2018,57(3):1-16.]
- [11] 高金龙,包菁薇,刘彦随,等.中国县域土地城镇化的区域差异及其影响因素[J].地理学报,2018,73(12):2329-2344. [Gao J L, Bao J W, Liu Y S, et al. Regional disparity and the influencing factors of land urbanization in China at the county level, 2000-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(12):2329-2344.]
- [12] 武进.中国城市形态:结构、特征及其演变[M].江苏:江苏科学技术出版社,1990. [Wu J. Urban form in China: structure, characteristics and evolution[M]. Jiangsu: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1990.]
- [13] Conzen M R G. Geography and townscape conservation [C]//Anglo-German Symposium in Applied Geography. 1975: 95-102.
- [14] 叶昌东,周春山.中国特大城市空间形态演变研究[J].地理与地理信息科学,2013,29(3):70-75. [Ye C D, Zhou C S. Urban morphology evolution of Chinese metropolitans [J]. Geography and Geo-Information Science, 2013,29(3): 70-75.]
- [15] 闫梅,黄金川.国内外城市空间扩展研究评析[J].地理科学进展,2013,32(7):1039-1050. [Yan M, Huang J C. Review on the research of urban spatial expansion[J]. Progress in Geography, 2013,32(7):1039-1050.]
- [16] 周春山,王宇渠,徐期莹,等.珠三角城镇化新进程[J].地理研究,2019,38(1):45-63. [Zhou C S, Wang Y Q, Xu Q Y, et al. The new process of urbanization in the Pearl River Delta[J]. Geographical Research, 2019,38(1):45-63.]
- [17] 陈宏胜,李志刚,王兴平.中央—地方视角下中国城乡二元结构的建构——“一五计划”到“十二五规划”中国城乡演变分析[J].国际城市规划,2016,31(6):62-67,88. [Chen H S, Li Z G, Wang X P. The construction of urban-

- rural dual structure from a central-local government perspective: study on the evolution of urban and rural China from the First Five-year Plan to the Twelfth Five-year Plan [J]. *Urban Planning International*, 2016,31(6):62-67,88.]
- [18] 李久枫,余华飞,付迎春,等.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*,2018,37(2):287-298. [Li J F, Yu H F, Fu Y C, et al. 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*, 2018,37(2):287-298.]
- [19] 陈彦光. Beckmann城市体系异速生长模型的理论基础与实证分析[J]. *科技通报*,2002,18(5):360-367. [Chen Y G. Derivations of Beckmann's allometric growth equation from Beckmann's class-size model of city hierarchies[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2002,18(5):360-367.]
- [20] Batty M, Longley P A. *Fractal cities: A geometry of form and function*[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [21] Frankhauser P. The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations[J]. *Population: An English Selection*, 1998,10(1):205-240.
- [22] Nordbeck S. Urban allometric growth[J]. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 1971,53(1):54-67.
- [23] Lee Y. An allometric analysis of the US urban system: 1960- 80[J]. *Environment and Planning A*, 1989,21(4): 463-476.
- [24] 陈彦光. 城市化水平增长曲线的类型、分段和研究方法 [J]. *地理科学*,2012,32(1):12-17. [Chen Y G. On the urbanization curves: Types, stages, and research methods [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012,32(1):12-17.]
- [25] 李郇,陈刚强,许学强. 中国城市异速增长分析[J]. *地理学报*,2009,64(4):399-407. [Li X, Chen G Q, Xu X Q. Urban allometric growth in China: theory and facts[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(4):399-407.]
- [26] 梁进社,王旻. 城市用地与人口的异速增长和相关经验研究[J]. *地理科学*,2002,22(6):649-654. [Liang J S, Wang M. The allometric growth of urban land use and population and its experiential research[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002,22(6):649-654.]
- [27] 赵静滢,陈彦光,李双成. 京津冀城市用地形态的双分形特征及其演化[J]. *地理科学进展*,2019,38(1):77-87. [Zhao J T, Chen Y G, Li S C. Bi-fractal structure and evolution of the Beijing-Tianjin-Hebei region urban land-use patterns[J]. *Progress in Geography*, 2019,38(1):77-87.]
- [28] 陈彦光,张莉. 信阳城市人口——城区用地异速生长分析 [J]. *地理科学进展*,2014,33(8):1058-1067. [Chen Y G, Zhang L. An allometric analysis of the scaling relations between population and urban area of Xinyang[J]. *Progress in Geography*, 2014,33(8):1058-1067.]
- [29] Weng Q, Yang S. An approach to evaluation of sustainability for Guangzhou's urban ecosystem[J]. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2003,10(1):69-81.
- [30] 姚之浩,田莉. 21世纪以来广州城市更新模式的变迁及管治转型研究[J]. *上海城市规划*,2017(5):29-34. [Yao Z H, Tian L. Transition of pattern and modes of governance for urban renewal in Guangzhou since the 21st Century[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2017(5):29-34.]
- [31] Fu Y, Li J, Weng Q, et al. Characterizing the spatial pattern of annual urban growth by using time series Landsat imagery[J]. *Science of The Total Environment*, 2019,666: 274-284.
- [32] 蒋丽,吴缚龙. 2000—2010年广州人口空间分布变动与多中心城市空间结构演化测度[J]. *热带地理*,2013,33(2): 147-155. [Jiang L, Wu F L. Guangzhou population spatial distribution and polycentricity spatial structure evolution[J]. *Tropical Geography*, 2013,33(2):147-155.]
- [33] 吴一凡,刘彦随,李裕瑞. 中国人口与土地城镇化时空耦合特征及驱动机制[J]. *地理学报*,2018,73(10):1865-1879. [Wu Y F, Liu Y S, Li Y R. Spatio-temporal coupling of demographic-landscape urbanization and its driving forces in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73 (10):1865-1879.]
- [34] 广东省发展计划委员会,广东省统计局. 广东小城镇统计资料汇编[M]. 广州:广东省发展计划委员会,广东省统计局,2000. [Guangdong Provincial Development Planning Commission, Guangdong Provincial Bureau of Statistics. *Guangdong Small Town Statistics Compilation*[M]. Guangzhou: Guangdong Provincial Development Planning Commission, Guangdong Provincial Bureau of Statistics, 2000.]
- [35] 广州市第五次人口普查办公室. 广州市第五次全国人口普查资料开发应用成果选编[M]. 广州:广州市第五次人口普查办公室,2000. [Guangzhou Fifth Census Office. *Selected and compiled results of the fifth national census data development in Guangzhou*[M]. Guangzhou: Guangzhou Fifth Census Office, 2000.]
- [36] <http://tjj.gz.gov.cn/gzstats/rkpc6/t1-05.htm>.
- [37] 广州市荔湾区统计局. 2015荔湾统计年鉴[M]. 广州:广州市荔湾区统计局,2015. [Guangzhou Liwan District Statistics Bureau. *2015 Liwan statistical yearbook*[M]. Guangzhou: Guangzhou Liwan District Statistics Bureau, 2015.]
- [38] 广州市白云区统计局. 2015白云统计年鉴[M]. 广州:广州市白云区统计局,2015. [Guangzhou Baiyun District Statistics Bureau. *2015 Baiyun statistical yearbook*[M]. Guangzhou: Guangzhou Baiyun District Statistics Bureau, 2015.]

- [39] 广州市越秀区统计局.2015越秀统计年鉴[M].广州:广州市越秀区统计局,2015. [Guangzhou Yuexiu District Statistics Bureau. 2015 Yuexiu statistical yearbook[M]. Guangzhou: Guangzhou Yuexiu District Statistics Bureau, 2015.]
- [40] 广州市天河区统计局.2015天河统计年鉴[M].广州:广州市天河区统计局,2015. [Guangzhou Tianhe District Statistics Bureau. 2015 Tianhe statistical yearbook[M]. Guangzhou: Guangzhou Tianhe District Statistics Bureau, 2015.]
- [41] 广州市海珠区统计局.2015海珠统计年鉴[M].广州:广州市海珠区统计局,2015. [Guangzhou Haizhu District Statistics Bureau. 2015 Haizhu statistical yearbook[M]. Guangzhou: Guangzhou Haizhu District Statistics Bureau, 2015.]
- [42] 广州市从化区统计局.2015从化统计年鉴[M].广州:广州市从化区统计局,2015. [Guangzhou Conghua District Statistics Bureau. 2015 Conghua statistical yearbook[M]. Guangzhou: Guangzhou Conghua District Statistics Bureau, 2015.]
- [43] 广州市增城区统计局.2015增城统计年鉴[M].广州:广州市增城区统计局,2015. [Guangzhou Zengcheng District Statistics Bureau. 2015 Zengcheng statistical yearbook [M].Guangzhou: Guangzhou Zengcheng District Statistics Bureau, 2015.]
- [44] 广州市番禺区统计局.2015番禺统计年鉴[M].广州:广州市番禺区统计局,2015. [GuangzhouPanyu District Statistics Bureau. 2015 Panyu statistical yearbook[M].Guangzhou: Guangzhou Panyu District Statistics Bureau, 2015.]
- [45] 广州市南沙区统计局.2015南沙统计年鉴[M].广州:广州市南沙区统计局,2015. [Guangzhou Nansha District Statistics Bureau. 2015 Nansha statistical yearbook[M]. Guangzhou: Guangzhou Nansha District Statistics Bureau, 2015.]
- [46] 广州市花都区统计局.2015花都统计年鉴[M].广州:广州市花都区统计局,2015. [GuangzhouHuadu District Statistics Bureau. 2015 Huadu statistical yearbook[M].Guangzhou: Guangzhou Huadu District Statistics Bureau, 2015.]
- [47] 彭建,魏海,武文欢,等.基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例[J].生态学报,2018,38(11):3741-3755. [Peng J, Wei H, Wu W H, et al. Storm flood disaster risk assessment in urban area based on the simulation of landuse scenarios: A case of Maozhou Watershed in Shenzhen City[J]. ActaEcologicaSinica, 2018,38(11):3741-3755.]
- [48] 张亮,岳文泽.城市生态空间的多元综合识别研究——以杭州市为例[J/OL].生态学报,2019(17):1-9[2019-08-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20190531.1652.006.html>. [Zhang L, Yue W Z. Integrated recognition of urban ecological space: A case study on Hangzhou[J/OL]. ActaEcologicaSinica,2019(17):1- 9[2019- 08- 05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20190531.1652.006.html>.]
- [49] 彭建,徐飞雄.不同格网尺度下的黄山市生境质量差异分析[J].地球信息科学学报,2019,21(6):887-897. [Peng J, Xu F X. Effect of grid size on habitat quality assessment: A case study of Huangshan City[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(6):887-897.]
- [50] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J].自然资源学报,2019,34(4):771-784. [Huang M Y, Yue W Z, Feng S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(4):771-784.]
- [51] Zhu, Z, Woodcock, C.E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment. 2012,118(6),83-94.
- [52] Zhu, Z, & Woodcock, C. E. Continuous change detection and classification of landcover using all available Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment, 2014,144:152-171.
- [53] Zhu Z, Fu Y, Woodcock C E, et al. Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from Guangzhou, China (2000 - 2014)[J]. Remote Sensing of Environment, 2016,185:243-257.
- [54] 姚月.城市边缘区空间发展探讨——以北京市海淀区为例[J].地球信息科学学报,2014,16(2):214-224. [Yao Y. Spatial development of urban fringe: a case study of Haidian District, Beijing[J]. Journal of Geo- information Science, 2014,16(2):214-224.]
- [55] 陈彦光.分形城市系统的空间复杂性研究[D].北京:北京大学,2004. [Chen Y G. Studies on spatial complexity of fractal urban systems[D]. Beijing: Peking University, 2004.]
- [56] Chen Y G. 2010. Characterizing growth and form of fractal cities with allometric scaling exponents[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2010, Article ID 194715:22.