

宝鸡文理学院学报(自然科学版),第38卷,第3期,第1-5页,2018年9月

Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science), Vol. 38, No. 3, pp. 1-5, Sept. 2018

DOI:10.13467/j.cnki.jbuns.

<http://>

珠三角城市群空间扩展格局及其驱动力因子分析^{*}

——基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS影像

马瑞峰^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 3. 甘肃省地理国情监测实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:目的 揭示珠三角城市群空间扩展格局及其驱动力因子。方法 以珠三角城市群9个主体城市为例,采用1992,1997,2002,2007,2012,2017年6期夜间灯光数据为数据源,提取出珠三角城市群空间范围,分别从扩展强度指数、扩展关联模型及多维驱动力机制3方面探索了珠三角城市群空间扩展过程、格局及动力机制。结果 1992—2017年珠三角城市群空间扩展格局表现为圈层辐射状扩展模式,且热点区与冷点区分布相对稳定;从珠三角城市群扩展的驱动力演化趋势看,表现出以市场力为主要驱动力因子的特征,其次是行政力与内源力,外向力的影响作用最弱,从2002—2012年动态变化角度看,后一阶段经济及社会因素对城市群空间扩展影响作用均有所减弱。结论 提出持续深化改革、加大市场主导机制、降低行政干预的政策建议,促进城市群空间结构持续优化及优势互补。

关键词:珠三角城市群;夜间灯光数据;空间扩展;地理探测器

中图分类号:F299.27;P237

文献标志码:A

文章编号:1007-1261(2018)03-0000-08

Analysis of the spatial expansion pattern and its driving factors of Pearl River Delta urban—metropolitan region on the basis of DMSP/OLS and NPP/VIIRS image

MA Rui-feng^{1,2,3}

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China;

3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: Purposes—To reveal the spatial expansion pattern and its driving factors of Pearl River Delta urban—metropolitan region. **Methods**—Taking 9 major cities in Pearl River Delta urban—metropolitan region as an example, the space extent of Pearl River Delta urban agglomeration is extracted by using the nighttime light data of 1992, 1997, 2002, 2007, 2012 and 2017. The expansion process, pattern and dynamic mechanism of Pearl River Delta urban agglomeration are explored from three aspects: the expansion intensity index, the expansion correlation model and the multi-dimensional dynamic mechanism. **Results**—The spatial expansion pattern of Pearl River Delta urban agglomeration from 1992 to 2017 is the radial expansion mode of the circle, and the distribution of the

^{*} 收稿日期:2018-04-08,修回日期:2018-05-15,网络出版时间:2018-09-20 12:20:21

基金项目:国家重点研发计划资助(2017YFB0504201);国家自然科学基金(41761082)

作者简介:马瑞峰(1992-),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向:摄影测量与遥感、遥感地学分析。Email:mrf201588@163.com

hot spot and cold spot is relatively stable. From the evolution trend of the expansion of Pearl River Delta urban agglomeration, the main driving force is the market power and followed by the influence of the administrative power and the endogenous power. The weakest impact is the exogenous power. From the dynamic change from 2002 to 2012, economic and social factors weakened on the expansion of urban agglomeration in the latter stage. **Conclusions**—Some policy suggestions were put forward to optimize metropolitan spatial structure and complementary advantages, such as continuity of deepening reform, building market-driven mechanism, reducing administrative intervention.

Key words: Pearl River Delta urban-metropolitan region; nighttime light data; space expansion; Geo detector

改革开放以来,珠三角地区经济活力被持续激发,与港澳实现了经济一体化发展,随着粤港澳大湾区作为顶层设计纳入国家战略,珠三角城市群经济辐射力度将不断加强,对粤港澳大湾区经济产生积极而又深远的影响。

城市群是工业化和城镇化发展到高级阶段的产物,也是都市区和都市圈发展到高级阶段的产物^[1]。已有学者对珠三角城市群扩展分析做了初探,其中 Lin 以珠三角城市群为例,发现在实施改革开放战略以来,城市群空间增长率先发生在中心城市之间的城乡结合部^[2-3],叶玉瑶等从国土开发角度分析了珠三角城市群国土开发模式的时空特征^[4],丁俊等对珠三角城市群不同时期的工业生产空间信息进行了精准提取,分析了其空间格局扩展、特征及影响因素^[5-6]。改革开放以来,珠三角经济发展迅速,城市间相互影响不断增强,城市结构及体系的各方面都经历了巨大变革^[7],研究珠三角城市群空间扩展格局及驱动力因子影响,有利于促进珠三角城市间的优势互补、区域体系空间结构的优化和区域发展战略的确定。遥感技术的发展使快速、大尺度监测城市空间扩展成为可能,本文采用新型遥感数据——灯光影像,利用校正处理后的夜间灯光数据将相关指标空间化,定量分析了珠三角城市群空间扩展格局,并揭示其扩展驱动机制。

美国国防气象卫星提供的夜间灯光数据易于获取、易于处理、数据量小,能够克服传统方式的一系列缺点,适合大尺度、长序列城市空间扩展及与人类活动相关经济指标的研究。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源及处理

可获取的灯光数据具有大范围、长序列、数据量小等特点,大范围表现在可获取的稳定灯光数据可覆盖全球区域;DMSP/OLS 数据有很长的时间跨度,长达 21 a 的数据(1992—2013 年)分别由

6 颗卫星采集: F10(1992—1994), F12(1994—1999), F14(1997—2003), F15(2000—2007), F16(2004—2009), F18(2010—2013), 其中存在由不同传感器获取同一年影像的情况,因此长序列的不同卫星获取的夜间灯光数据在兼容性和稳定性方面存在一定的差异,需要经过一系列的校正预处理手段,使其在长序列研究中具有可比性并且使灯光影像能真实的反映城市扩展特征;DMSP/OLS 灯光影像的分辨率为 1 km,可利用的可见光-近红外(VNIR)通道辐射分辨率为 6 bit, DN 值范围为 0~63,由于其数据量小及低分辨率的特性,对于大尺度范围的研究有独特优势。另外,为了获取最近时相的珠三角城市群建成区情况,选取了一期 2017 年 7 月合成的 NPP/VIIRS 夜间灯光影像, NPP/VIIRS 灯光数据与 DMSP/OLS 相比,具有高空间分辨率、高辐射分辨率及不存在灯光溢出的优点^[8]。

对上述获取的 DMSP/OLS 灯光数据通过 4 个步骤进行处理,提取出不同年份珠三角城市群真实空间边界(图 1)。

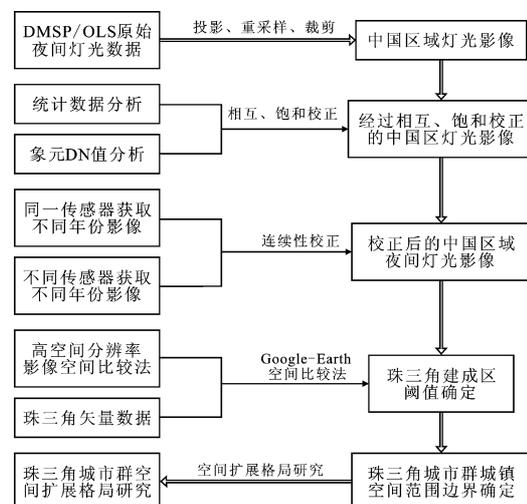


图 1 夜间灯光数据处理流程

Fig. 1 Technical processes of nighttime light data processing

① 对原始灯光影像进行投影、重采样、裁剪等基本预处理,获取中国区域的灯光影像数据。② 利用基于不变目标区域的方法对长序列的中国灯光影像进行相互校正和饱和校正^[9],经过相互校正使不同年份的 DMSP/OLS 灯光影像获取的同一区域的影像具有可别性,经过饱和校正使得每一期原始影像中存在的 DN 值饱和现象得到一定减弱。③ 对于不同卫星传感器获取的同一年灯光影像进行年内数据整合,对于多传感器、不同年份获取的灯光影像存在的异常波动现象进行跨年数据整合。通过上述 3 个步骤,可获取经过相互校正、饱和校正及连续性校正的中国区夜间灯光影像,满足了在长序列应用研究中的需求。④ 利用矢量数据裁剪出珠三角城市群研究区,通过 Google Earth 空间对比法,确定珠三角城市群城市边界阈值^[10],以获得研究珠三角城市群空间

扩展机制及其驱动力因子的基础数据。

由于 DMSP/OLS 夜间灯光影像存在灯光溢出现象,因此在城市及城市群扩展研究中,确定真实反映建成区的像元阈值尤为重要。已有许多学者对夜间灯光提取建成区的阈值做了探索性和深入性研究,总结前人研究成果,主要有经验阈值法、突变检验法、统计数据法及较高分辨率影像数据空间对比法^[11-14] 4 类提取阈值方法。上述方法在提取过程中的操作便捷程度、对其他数据的依赖程度和自动化程度等方面各有特点。其中,较高分辨率影像数据空间对比法,通过 Google Earth 影像空间比较法进行建成区阈值提取,其优势在于不受统计数据限制、操作简便,且该方法适用于地形复杂、形态多样的大尺度空间提取城市建成区^[15]。本文通过该方法提取的 6 期珠三角城市群空间范围如图 2 所示。

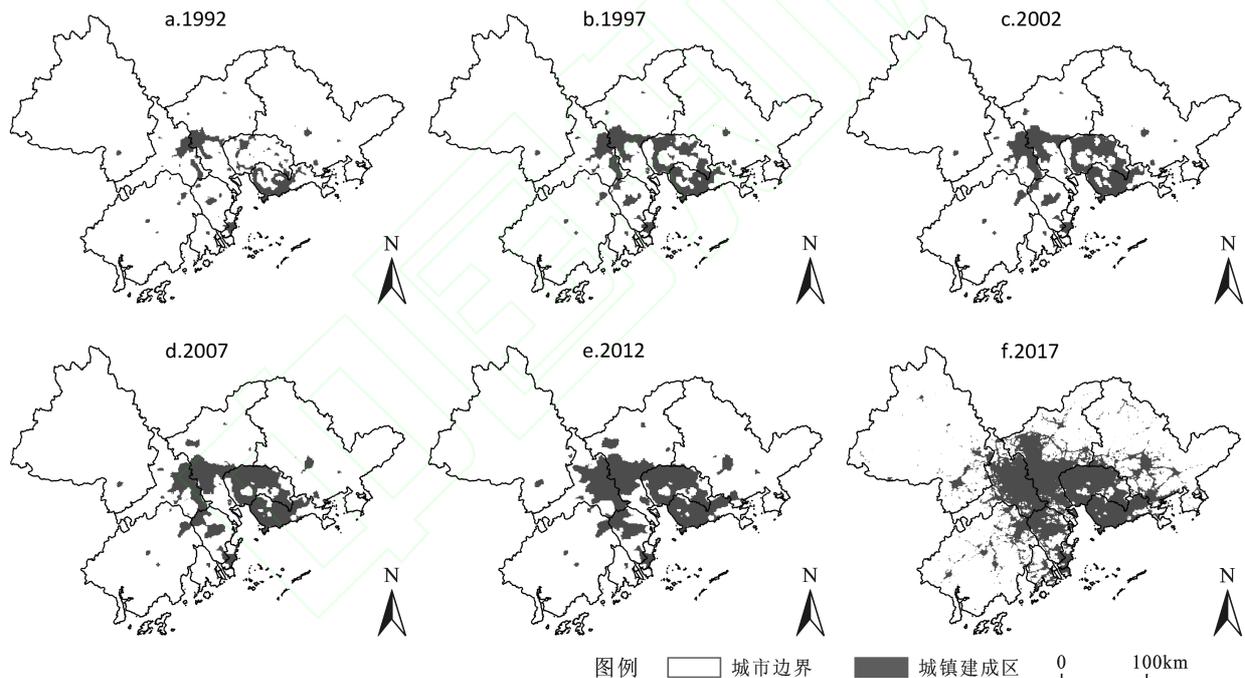


图 2 1992—2017 年珠三角城市群时空扩展进程

Fig. 2 Spatial-temporal expansion of Pearl River delta urban metropolitan region in 1992—2017

1.2 研究方法

1) 城市群空间扩展强度指数

城市群空间扩展强度指数是指在一定时间间隔内的城市用地扩张面积占整个城市群区域面积的百分比,用以表征扩张程度和速度,由城市群扩张面积、研究时间间隔及研究区单元土地总面积决定,其表达式为:

$$E = \frac{(UA_{t+m} - UA_t) \times 100}{TLA \times m} \quad (1)$$

式中: E 为城市群空间扩展强度指数; UA_{t+m} , UA_t 分别代表第 $t+m$ 年和第 t 年的珠三角城市群建成区面积; m 为研究时段的时间间隔; TLA 表示研究区域土地总面积。

2) Moran's I 指数

利用灯光数据提取出城市群建成区空间信息后,为了衡量不同时间间隔珠三角城市群扩展的聚集或者扩散特征,引入计量地理学中研究空间数据存在某种空间联系和关联性的方法——空间

自相关模型,其核心思想源于地理学第一定律,空间自相关的计算方法包括 Moran's I, Geary's C, Getis, Join count 等,通过 Moran's I 指数计算珠三角城市群空间扩展的聚集或者扩散特征, Moran's I 计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (2)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中: I 为 Moran 指数; n 代表珠三角城市群中县级尺度的城市数量; x_i 为珠三角城市群中县级尺度第 i 个城市的扩展面积; ω_{ij} 为空间权重矩阵; Moran 指数 I 的取值一般在 $-1 \sim 1$ 之间,当 I 的值越接近 1, 表示在珠三角城市群中县级尺度上空间增长呈现聚集状态,当 I 的值越接近 -1 , 表示县级尺度上空间增长呈现出离散状态。

3) 热点分析

利用夜间灯光数据提取出珠三角城市群空间信息后,本文采用 Getis - Ord G_i^* 测度了城市群空间扩展在局部水平上的空间聚集程度,揭示了珠三角城市群空间扩展强度的冷、热点区的空间分布格局, Getis - Ord G_i^* 的计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_j \omega_{ij} x_j}{\sum_j x_j} \quad (3)$$

对于 G_i^* 统计量的检验值为:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{Var(G_i^*)}} \quad (4)$$

式中: ω_{ij} 为以距离定义的空间权重; x_i 和 x_j 分别表示城市 i 和城市 j 的建成区面积; $E(G_i^*)$ 和 $Var(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的数学期望和变异系数。

4) 地理探测器

城市群空间扩展是工业化、城镇化、全球化、分权化等多维复杂要素综合作用的结果^[16]。借鉴前人研究成果,将影响城市群空间扩张的因素归纳为行政力、外向力、市场力和内源力等 4 个方面^[17]。

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[18]。利用地理探测器分析珠三角城市群城市扩展的空间分异,以灯光影像中珠三角城市群县域空间象元总亮度值(TNL)为因变量(Y)。城市群驱动力因子选取固

定资产总额(X1)、社会消费品零售总额(X2)、外商直接投资(X3)、乡镇企业总产值(X4)分别代表行政力、市场力、外向力和内源力。为了探测城市群空间扩展驱动力因子的动态变化,选取了 2002 和 2012 年 2 个时间点。2002 年及 2012 年固定资产总额(FAI)、社会消费品零售总额(SCGR)、外商直接投资(FDI)、乡镇企业总产值(TEOV)等数据均来源于相应年份的《广东省统计年鉴》。通过地理探测器得出了分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测及生态探测 4 方面的结果,并对结果进行分析与讨论。

2 珠三角城市群时空扩展格局演进

2.1 珠三角城市群空间扩展强度

对珠三角地区 DMSP/OLS 经过一系列校正预处理后,通过设定建成区空间范围阈值,获取了 1992, 1997, 2002, 2007, 2012, 2017 年 6 期的城市群建成区空间范围(图 2),其中 2017 年的数据源来自 NPP/VIIRS。由于数据源的获取时段限制,此处空间扩展强度研究时段为 1992—2012 年。依据不同空间尺度不同时段(1992—1997 年、1997—2002 年、2002—2007 年、2007—2012 年)计算珠三角城市群空间扩展强度(表 1)。以珠三角城市群为度量尺度的空间扩展强度指数分别为 0.55, 0.24, 0.38, 0.68, 以珠三角城市群中地级市为主的中心城市的空间扩展强度指数分别为 0.66, 0.18, 0.70, 1.33, 以珠三角城市群中县级尺度为主的次中心城市的空间扩展强度指数分别为 0.16, 0.35, 0.91, 1.12。从 3 种尺度城市群空间扩展强度可以看出,中心城市与次中心城市的空间扩展强度指数均呈现出逐渐增加的趋势,但次中心城市空间扩展强度指数增长趋势更加明显。这一特征表明,珠三角城市群空间扩展呈现出多中心的扩展态势,且次中心城市建成区的空间增长有更大的发展潜力及动力。

表 1 1992—2012 年珠三角城市群空间扩展强度

Table 1 Spatial expansion intensity index of Pearl River delta urban metropolitan region in 1992—2012

	空间扩展强度/%			
	1992—1997	1997—2002	2002—2007	2007—2012
珠三角城市群	0.55	0.24	0.38	0.68
中心城市(地级市)	0.66	0.18	0.70	1.33
次中心城市(县级城市)	0.16	0.35	0.91	1.12

2.2 城市群空间扩展聚集特征

利用 Moran's I 指数计算不同时间段内珠三

角城市群扩展聚集特征的空间自相关性,1992—2002年、2002—2012年2个时段的 Moran's I 指数分别为 0.038, 0.029, Z 值得分分别为 1.01, 0.57(图 3),说明珠三角城市群空间扩展的聚集自相关性没有呈现出明显的显著性,而是呈现出持续的“分散”态势,这一特征与京津冀城市群的空间扩展格局截然不同。相关研究表明,转型时期京津冀城市群空间扩展呈现出持续的“聚集”态势,城市群空间扩展率先发生在北京、天津、唐山等核心城市^[19],可以归纳为聚集导向下的城市群空间扩展模式。

2.3 城市群空间扩展热点分析

为了进一步评价不同时间段内珠三角城市群空间扩展聚集的空间分布,利用校正处理后的夜间灯光数据,以县级尺度为评价单元,分别计算了1992—1997年、1997—2002年、2002—2007年、2007—2012年 Getis-Ord G_i^* 指数,按照自然间断法,将 Getis-Ord G_i^* 统计量由高到底分为5类,得到了珠三角城市群空间扩展聚集的冷热点空间分布(图 3)。

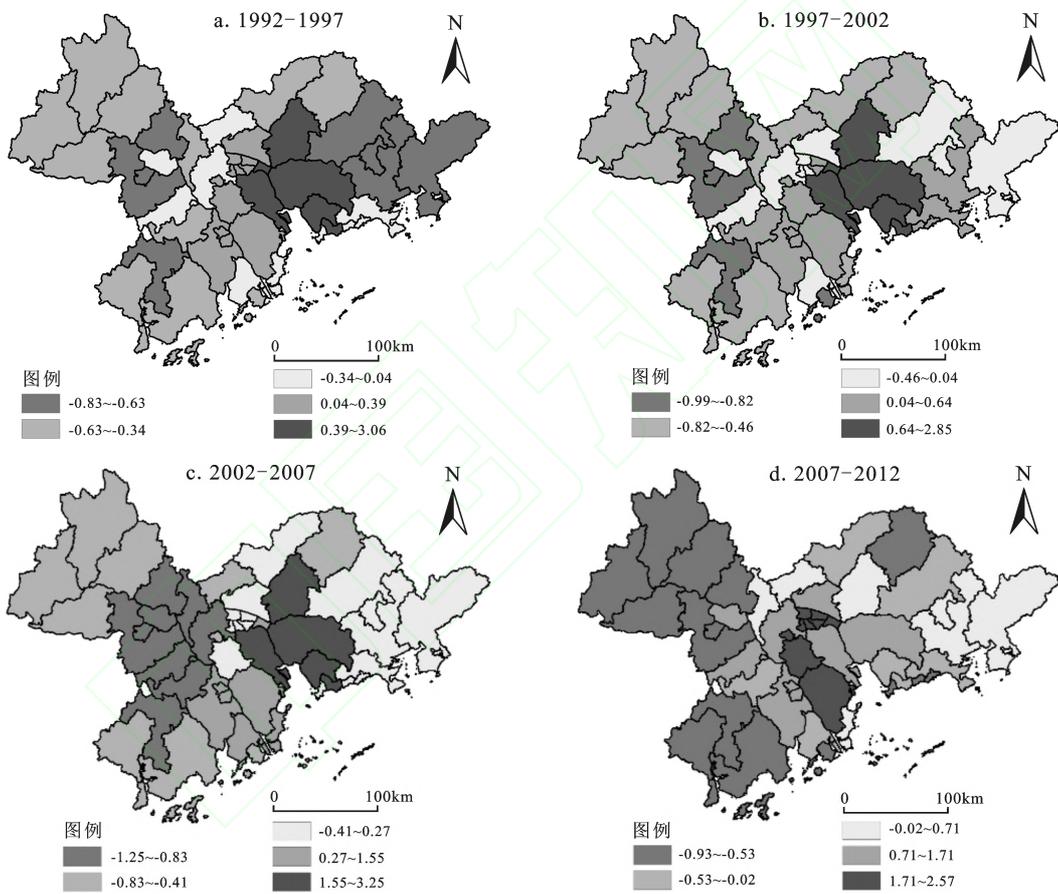


图3 1992—2012年珠三角城市群空间扩展热点分布结果

Fig. 3 Results of hot spot analysis of Pearl River delta urban metropolitan region in 1992—2012

1992—2012年珠三角城市群空间扩展热点分布结果表明,从1992年到2012年,珠三角城市群扩展的热点表现出稳定的空间分布,呈现出以中心城市及次中心城市为主的聚集态势,且热点分布也表现出由中心向次中心城市转移的趋势;冷点区呈现先减少后增加的态势,且冷点区域稳定分布在次中心城市。1992—1997年、1997—2002年、2002—2007年空间扩展热点区域分布稳定,热点区域比重分别为 11.6%, 11.6%,

11.4%,而2007—2012年空间扩展热点分布比重为 5.7%。冷点分布由1992—1997年的 26.5%下降到1997—2002年的 7.5%,在2002—2007年、2007—2012年期间冷点分布持续增大,分别为 17.25%, 43.75%。在前3个扩展阶段中,广州、深圳、东莞持续为“热点区”的中心区域,由于受到城市用地限制及政策等因素影响,2007—2012年中,“热点区”向中山、佛山等次中心城市转移。总体来看,1992—2017年珠三角城市群空

间扩展格局表现为圈层辐射状扩展模式(图4),且这种模式呈现出强大的空间惯性及发展潜力。再者,各个时段的城市群扩展都呈现出明显的趋向性发展,由中心城市之间的郊区趋向大都市区的快速城市化发展,这是由于广州市及香港特别行政区的牵引作用,使得这2个中心城市之间的城镇用地扩展速度明显高于其它区域。

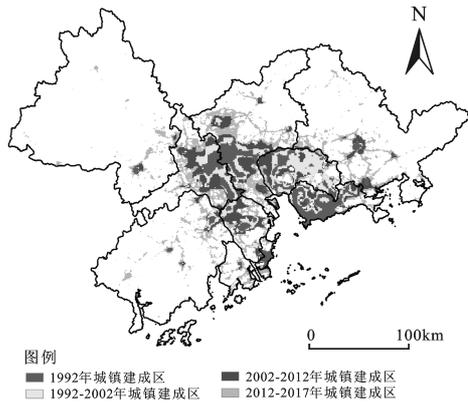


图4 1992—2017年珠三角城市群空间扩展格局
Fig. 4 Spatial expansion pattern of Pearl River delta urban metropolitan region in 1992—2017

3 珠三角城市群时空扩展影响机理分析

3.1 驱动力因子探测过程

利用地理探测器分析珠三角城市群空间扩展驱动力因子之前,需要对因变量及驱动力因子变

量进行符合地理探测器软件要求格式的处理,即将驱动力因子变量离散化为类型量。图5表示通过等间距的网格生成的2218个网格点,用于将Y(数值量)和X(类型量)匹配起来。



图5 驱动力分析网格点
Fig. 5 Driving force analysis grid point

在 ArcGIS 平台进行数据处理得到城市群空间扩展率及各驱动力因素的分级图,如图6为2002年因变量(图a)及驱动力因子变量(图b—图e)的分级图。为了能够探测珠三角城市群空间扩展驱动力的时间变化特征,本研究选用2个时间点(2002年和2012年)进行分析。模型运算结果由风险区探测、风险因子探测、生态探测及交互探测4部分构成。

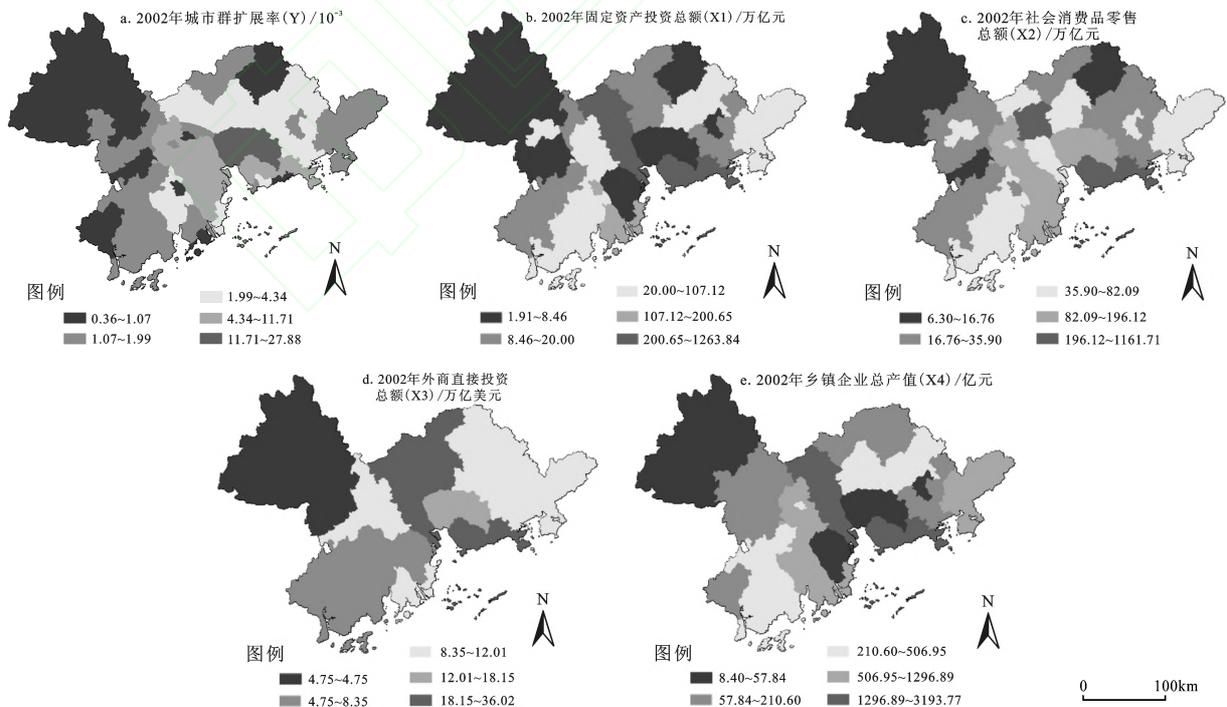


图6 珠三角城市群空间扩展驱动力要素

Fig. 6 Driving factor of Spatial expansion in the Pearl River delta urban metropolitan region

3.2 驱动力因子探测结果讨论

(1)通过风险区探测识别出单个因子的影响

结果。结果表明本文所选的4个影响因素均与空间扩展有良好的一致性,并通过了显著性水平为0.05的 t 检验。

(2)因子探测只是测度各影响因素对城市群扩展的影响力大小,表2为各影响因素的影响力大小, q 值越大表示各驱动力因子对珠三角城市群空间扩展的解释力越强,反之则越弱,影响强弱排序依次为:社会消费品零售总额>固定资产投资总额>乡镇企业总产值>外商直接投资总额。

表2 2002年珠三角城市群扩展因子影响力
Table 2 Spatial expansion factor influence of Pearl River delta urban metropolitan region in 2002

	固定资产 投资总额	社会消费品 零售总额	外商直接 投资总额	乡镇企业 总产值
q statistic	0.97	0.99	0.92	0.96
P value	0.000	0.000	0.000	0.000

(3)生态探测用于比较两影响因子对城市群空间分布的影响是否有显著差异。结果表明社会消费品零售总额与固定资产投资总额要显著强于其他影响因素,再次说明市场力及行政力对珠三角城市群扩展空间分布的控制作用。

(4)交互探测主要是为了识别不同的影响因子对城市群空间扩展是否存在交互作用,即反映两因子共同作用是否会增加或者减弱对城市群空间扩展的解释力。结果表明,对任意两因素进行叠加均会增强其对城市群扩展空间分布的解释力,同时也说明城市群空间扩展是由工业化、城镇化、全球化、分权化等多维复杂要素共同作用的结果。

从2002—2012年的动态变化角度看,珠三角城市群建成区空间范围不断扩展,从灯光影像上可以明显识别。究其空间扩展驱动力因子的变化,从地理探测器探测结果可以看出,2012年影响因子中,行政力、市场力、外向力及内源力较2002年对城市群扩展空间分布的解释力均有所减弱,其中行政力、市场力、内源力对珠三角城市群空间扩展的影响作用相当,其 q 统计量均为0.926,外向力依然是4种驱动力因子对城市群扩展空间分布解释力最弱的一个。2012年4种驱动力因子对城市群扩展空间分布解释力下降是由于城镇扩展是社会、经济、地理共同作用的结果^[20],而本文考虑的驱动力因子只涉及到社会及经济方面,没有涉及到地理因素的作用,因此这一阶段涉及的影响因素更加复杂。不同时期的驱动

力因子会对珠三角城市群扩展空间分布有不同的解释力,而且相较于2002年,现阶段影响珠三角城市群空间扩展的影响因素显然更加复杂。

4 结论与讨论

本文基于多时相夜间灯光数据,分析了珠三角城市群空间扩展格局及驱动机制。结果表明:

(1)1992—2017年间,珠三角地区中心及次中心城市扩展强度指数均呈现出逐渐增加的趋势,但次中心城市的扩展强度增长趋势更加明显,次中心城市建成区空间增长有更大的发展潜力及动力。

(2)在此期间,珠三角城市群扩张的“热点区”与“冷点区”分布相对稳定,扩展路径呈现出圈层辐射状扩展模式。

(3)运用地理探测器探索珠三角城市群扩展的驱动力机制,表现出以市场力为主要驱动力因子的特征,其次是对城市群空间扩展影响作用相当的行政力与内源力,外向力的影响作用最弱,从2002—2012年动态变化角度看,四大驱动力因子对城市群扩展的空间分布解释力依然很强,但影响作用均呈现下降趋势,表明后一阶段经济及社会因素对城市群扩展影响作用有所减弱,同时地理因子的影响作用在增强。

综上,提出继续深化改革、加大市场主导机制、降低行政干预的政策建议,促进城市群空间结构持续优化及优势互补,以期为粤港澳大湾区经济产生积极而又深远的影响。

参考文献:

- [1] 方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130-1144.
- [2] LIN GEORGE C S. Metropolitan development in a transitional socialist economy: Spatial restructuring in the Pearl River Delta, China[J]. Urban Studies, 2001, 38(3): 383-406.
- [3] LIN GEORGE C S. State policy and spatial restructuring in post-reform China, 1978—95[J]. International Journal of Urban and Regional Research, 1999, 23(4): 670-696.
- [4] 叶玉瑶, 李升发, 张虹鸥, 等. 国土开发密度三维综合评估——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 2017, 37(1): 43-55.
- [5] 丁俊, 王开泳. 珠三角城市群工业生产空间的时空演化及驱动机制[J]. 地理研究, 2018, 37(1): 53-66.
- [6] 丁俊, 王开泳. 珠江三角洲城市群工业生产空间格局、形态特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2016,

- 35(5):610-621.
- [7] 梅志雄,徐颂军,欧阳军,等.近20年珠三角城市群城市空间相互作用时空演变[J].地理科学,2012,32(6):694-701.
- [8] SHI K F, YU B L, HUANG Y X, et al. Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: a comparison with DMSP-OLS data[J]. Remote Sensing, 2014, 6(2): 1705-1724.
- [9] ELVIDGE C D, ZISKIN D, BAUGH K E, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. Energies, 2009, 2(3): 595-622.
- [10] 宋金超,李新虎,齐涛,等.基于夜晚灯光数据和Google Earth的城市建成区提取分析[J].地球信息科学学报,2015,17(6):750-756.
- [11] SUTTON P, ROBERT S D, ELVIDGE C, et al. Census from Heaven: An estimate of the global human population using night-time satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(16): 3061-3076.
- [12] IMHOFF M L, LAWRENCE W T, STUTZER D C, et al. A technique for using composite DMSP/OLS "City Lights" satellite data to map urban area [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(3): 361-370.
- [13] HENDERSON M, YEH E T, GONG P, et al. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(3): 595-609.
- [14] 何春阳,史培军,李景刚,等.基于DMSP/OLS夜间灯光数据和统计数据的中国大陆20世纪90年代城市化空间过程重建研究[J].科学通报,2006,51(7):856-861.
- [15] 舒松,余柏菡,吴健平,等.基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J].遥感技术与应用,2011,26(2):169-176.
- [16] 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.
- [17] 欧向军,甄峰,秦永东,等.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,2008,27(5):993-1002.
- [18] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [19] 王利伟,冯长春.转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制——基于夜间灯光数据方法[J].地理学报,2016,71(12):2155-2169.
- [20] 徐秋蓉,郑新奇.一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法[J].测绘学报,2015,44(S0): 96-101.

(编校:李宗红)