

区域人口密度函数与增长模式： 兼论城市吸引范围划分的 GIS 方法

王法辉¹, 金凤君^{2*}, 曾 光²

(1. 美国北伊利诺大学地理系; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 区域人口密度函数是研究中心城市对周围区域影响的有效方法。为了控制自然因素对人口密度分布的影响, 本文的研究地域范围限定在我国四个主要的平原地区: 东北、华北、两湖平原和四川盆地。城市吸引范围是基于重力模型用 GIS 方法划分的。利用 1982 年至 1990 年的人口资料进行的模型模拟的结果表明, 我国区域人口分布特征同西方国家一样, 呈现出距离衰减特征, 即随离城市的距离的增加, 人口密度逐渐下降。由于城市经济增长的原因, 城市人口增长快于边远地区, 呈现出向心集聚的趋势。但不同区域集聚程度不一, 核心城市人口快速增长的区域, 腹地的人口增长比较迟缓; 而核心城市人口增长速度一般的区域, 腹地几乎是同步增长。

关键词: 区域密度函数; 区域增长模式; 城市吸引范围划分; GIS; 中国

中图分类号: K901.3; P208 **文章编号:** 1000-0585(2004)01-0097-07

1 引言

人口密度的空间分布往往是我们研究社会经济现象的地理规律的起点。人口作为劳动力或消费者, 其密度代表着经济活动的强弱程度; 另外人口数据的获取也比较方便可靠, 这对于发展中国家尤其如此^[1]。综观西方的文献, 关于城市内部人口密度空间分布的实证研究比较丰富, 从 Clark 负指数模型^[2]开始, 到后来的多种模型, 包括单中心模型^[3]和多中心模型^[4-8]。为了解释实证模型, 各种理论也得以发展, 其中影响最大的是 Mills - Muth 的经济学解释^[9,10]。如果说城市经济学的诞生和发展得益于学者们对城市人口空间分布有序性的极大兴趣, 也不为过。但对更大范围的区域人口分布的研究, 文献相对较少。西方社会城市人口占绝大多数, 吸引大量的研究兴趣, 也是可以理解的。

区域人口分布的理论可以上溯到 19 世纪早期的杜能区位论。沿袭着经典的杜能区位论, 一些学者^[11,12]从理论上提出了很多经济模型来解释区域人口分布形式。经济模型的解释很直观, 远离城市的农村居民需要把农产品运送到城市市场, 或者进城购买工业品和享受城市提供的服务, 都得付出运输成本。为此, 他们得到较为廉价、更多的土地作为补偿, 从而达到平衡, 呈现距离城市越远, 人口密度自然逐渐下降的趋势, 此现象可以用不同的密度函数来描述^[13]。这些理论模型是建立在市场经济某些假定基础上的, 在西方国家已得到实例验证^[14], 而是否适用于我国则需要验证。

收稿日期: 2003-06-18; 修订日期: 2003-09-22

基金项目: 中国科学院知识工程创新项目 (KZCX2-307-1)

作者简介: 王法辉 (1967-), 男, 湖北人, 副教授。从事城市地理、经济地理和 GIS 教学工作。E-mail: wang @geog.niu.edu.

*通讯简介: 金凤君, (1961-), 内蒙古人, 研究员。从事经济地理研究工作。E-mail: jinfj @igsnr.ac.cn.

中心城市对腹地(郊区和农村)的影响是一个复杂的动态过程,包括资本、商品、服务、信息、技术和人口的流动。如果这一过程导致腹地人口或其他经济活动的增加,则被认为是扩散;如果腹地的人口或经济活动下降,而中心城市上升,则这种影响就被认为是集聚。这些概念有助于我们理解中心城市与腹地的相互依赖性。常用的方法是用人口密度函数来分析区域结构及其变化^[14]。改革开放以来,我国经济发展很快,影响到区域结构变化。究竟城市对周围地区的发展有何影响?不同区域的发展模式又有何异同呢?

本文的研究目的有三个,首先分析我国的区域密度函数;其次,考察其在 1982 年到 1990 年间增长模式的区域差异;另外,区域的界定即城市吸引范围的划分,本文介绍的是 GIS 支持下的重力模型方法,重点在于研究区域结构的变化。

2 数据处理与研究区域的界定

相比于发达国家,我国的数据比较缺乏。因此许多对我国人口空间分布的研究都没有达到相应的深度,大都是一传统的描述性分析,还没有涉及到密度函数^[15]。近年来,关于我国的数字数据库,特别是 GIS 数据越来越多,包括在线的,为这一领域的研究开拓了新的空间。本文的大部分数据是从 CIESIN 网址^[16]上下载的,主要是其中的两个数据库:1990 年 1:100 万的我国县级行政区 GIS 数据;我国分县的人口(普查)和农业数据。此外,密歇根大学中国数据中心的鲍曙明提供了 1982 年的人口普查数据。我国县级行政区的数字地图提高了密度测算的精确度,也为更深入的空间分析创造了有利条件。

需要说明的一个技术问题是,将 1982 年和 1990 年的人口数据相匹配,进行 GIS 覆盖。通过比较不同年份出版的两本地图集(中国地图出版社,1983;星球地图出版社,1998),修正了更名的县级单元(包括少数民族地区的“旗”和大城市的“区”)代码,绝大多数县级单元得以匹配。另外,少数县级单元行政区划变化了,需将 1982 年或 1990 年分开的多个县级单元合并成另一年份的单个县级单元,从而实现匹配。

人口密度变化受到地形、气候和土地肥沃及利用程度等因素的影响。我国东部半个疆域,占 90% 以上的人口;西北干旱区和青藏高原高寒区人口稀少。由于本文的目的在于研究中心城市对其腹地的影响,希望选取自然条件相似的均质平原,就像杜

能模型里的“孤立国”。由于受到有效数据可获取性的限制,只能采取一种近似的方法。从我国县级农业数据中,初步挑选出耕地面积比例大于和等于 25% 的县(图 1),基本覆盖了我国的平原地区。包括:(1)华北平原与长江下游平原及邻近地区,东到山东半岛,东南至长江三角洲和杭州湾,向西达渭河平原;(2)东北平原;(3)四川盆地;(4)两湖平原;(5)其他小块平原,如东北三江平原(图 1 中的 5a)和河套平原(图 1 中的 5b)。研究的区域限于一些主要城市所在的上述从 1~4 四个平原地区。中心城市的选取将在下面介绍。根据 1982 年和 1990 年的统计数据,研究区总面积 106.6 万 km^2 , 占我国国土总面积的 11.1%, 人口占全国的 47%。研究区包括 766 个县级行政单位,1982 年平均人口密度是 623.07 人/ km^2 , 而 1990 年是 735.42 人/ km^2 , 增长了 18%。



图 1 研究区域的界定

Fig. 1 Defining the study areas

3 城市吸取范围划分的 GIS 方法

研究区域空间结构必须首先确定中心城市及其影响的区域范围。本文借鉴了已有的研究成果^[17]。顾朝林用 33 个变量综合成一个城市“综合实力指数”，这些变量包括：非农人口、城市建成区面积、城市人口密度、国民生产总值、运输与电信量、零售额等等。利用这个指标，顾朝林选定了 31 个中心城市，并由此划分了 31 个城市经济区。这 31 个城市经济区也可以合并成以 9 个特大城市为中心的 9 个大城市经济圈。这 31 个城市经济区区内经济联系密切，也适用于本研究。其中有 17 个在本文确定的研究区域内（图 2）。这 17 个城市并不一定是研究区域内最大的 17 个城市，但是每个城市都是所在经济区内的最大城市。即有的区的次位城市大于其他区的首位城市，如天津是我国最大的城市之一，距离北京非常近，但北京更大一些，因此选取北京为该区内的中心城市。顾朝林研究了城市以及彼此的关联问题，对城市经济区边界只有描述性的说明，没有具体划分其范围。

由于缺少城市与县之间诸如运输量、电信流或者金融交易等经济联系的数据，因而所选定的 17 个中心城市影响区域（腹地）的划分以重力模型为基础。比如， j 县受到 i 城市的辐射与影响，用如下公式来测算：

$$I_{ij} = C_i / r_{ij}^2, \quad (1)$$

式中 C_i 是 i 城市的人口规模， r_{ij} 是 j 县和 i 城市的距离， 2 是距离弹性系数。如果一个城市对某个县的影响值是所有城市对这个县影响值中最大的，那么这个县就被划归到这个城市的影响腹地内^[18]。(1) 式中距离衰减用负幂指数函数，而不是对数函数，是因为负幂指数函数更常见，容易找到实证研究对参数的取值^[9]。

这种方法在 GIS 上也比较容易实现，本研究采用 ArcGIS 软件。具体步骤如下：

准备两个 point coverages，一个是中心城市（上述所选择的 17 个点），另一个是县级单元 centroids（包括 766 个点）；利用 ArcToolbox 的 POINT

DISTANCE 功能，计算每个县级单元到中心城市的距离，得到一个 766×17 的距离矩阵；

将中心城市的人口数加入所得的距离矩阵，利用上述的重力模型计算每个中心城市对县级单元的影响力 I_{ij} （中心城市到自己的距离 $r_{ij} = 0$ ， I_{ij} 理论值是无穷大，这里可以赋一个任意大的值）；利用 ArcMap 打开距离矩阵，用 SUMMARIZE 功能寻找同一县级单元受 17 个中心城市影响中最大的 I_{ij} 值，产生的新数据表中，每个县级单元都有一个对应的中心城市，表示属于这个中心城市的吸引范围；将这一数据表加入县级单元的 polygon coverage，利用 ArcMap 的 DISSOLVE 功能合并属于同一中心城市吸引范围的县级单元，得到图 2 显示的城市吸引范围。

需要说明的是，(1) 式中 r_{ij} 是县级单元到中心城市的直线距离。如果有可靠的交通网络数据（包括路段的行车速度），可以利用 GIS 的网络分析模型，计算每个县级单元到中



图 2 依据重力模型划分的 17 个城市区域

Fig. 2 Region of 17 cities by the gravity model approach

心城市的最快行车时间，以此度量 r_{ij} ，然后根据上述同样的步骤计算 I_i ，划分城市吸引范围。那样划分的吸引范围就更有实际意义。

本研究中，赋值 $\alpha = 2.1$ ，也是借鉴了已有的研究成果^[19]。取值不同，得出的腹地范围也不同。越小，距离因素的影响越小，因此，大城市的腹地扩大，而小城市的腹地则缩小。不过，通过对 α 在 1.5~2.5 之间进行赋值检验，所划区域内密度函数基本稳定。这是因为区域边界发生变化的地区都是人口密度很低的边远农业县，对区域密度函数的影响并不大。图 2 显示的是基于 1982 年城市人口划分的区域。如果用 1990 年人口，区域边界基本不变。

4 区域人口密度函数

区域密度函数描述的是人口密度 D_r 如何随着到中心城市距离 r 的变化而变动。西方城市在空间结构上有一个很重要的特征，就是中心商业区（CBD）居住人口少，人口密度低，形成“密度低谷”，相应的区域密度函数比较复杂^[3]。我国大城市中心商业区还不太发达，密度低谷还不明显；加之本研究的数据基于较大的县级单元，很难刻画城近郊区人口密度变化趋势。这里，我们可以尝试四个简单的函数方程：

(A) 线型， $D_r = a + br$ ；(B) 指数型， $\ln(D_r) = a + br$ ；(C) 对数型， $D_r = a + b\ln(r)$ ；(D) 幂函数型， $\ln(D_r) = a + b\ln(r)$ 。以成都为例，其吸引范围包括 42 个县级单元。图 3 显示的是 1990 年的人口密度变化形式（1982 年类似）。显然人口密度随着离成都距离的增加而下降，起初 50km 内下降很快，50km 外变化不大。

表 1 是四种函数的回归结果。这四种密度函数中，(C) 式所得回归系数 R^2 最高。其他区域也是如此，(C) 式最适合于描述我国区域人口密度分布模式，回归结果见表 2。惟一例外是武汉地区，(D) 式所得 R^2 略高于 (C) 式。武汉地区这一特例主要是数据质量的问题，后面还要论及。注意这里讨论的是区域密度方程，而不是城市内部人口密度方程，后者多呈负指数函数分布，也就是 (B) 式^[3, 20]。

5 区域增长模式的讨论

表 2 中 R^2 值显示这一函数适用于大多数区域，只有武汉地区例外。武汉地区是特例，因为武汉市的人口密度是基于较大的市区面积计算的，包括了较大的农村地区，导致中心城市人口密度偏低，居然低于区内阜阳和襄樊等小城市。如果有更小地域单元的人口数据，这个问题就不会出现。其他区域都随着离城市距离的增加，密度下降，表明城市影响力随距离衰减。这一规律也适用于我国。

其次，从 1982 年到 1990 年，表 2 中所有区域的截距 a 和斜率 b 都增加了。截距的增

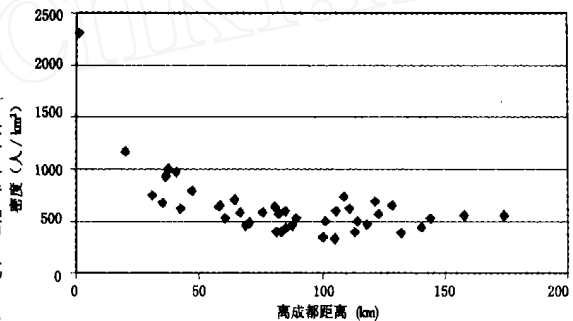


图 3 1990 年成都地区人口密度分布
Fig. 3 Distribution of population density of Chengdu Region in 1990

表 1 成都地区人口密度函数的回归结果 (1990)

Tab. 1 Regression results of Chengdu in 1990			
函数方程	a	b	R^2
(A) $D_r = a + br$	1047.01	- 4.78	0.341
(B) $\ln D_r = a + br$	6.86	- 0.0055	0.371
(C) $D_r = a + b\ln r$	2107.54	- 344.51	0.811
(D) $\ln D_r = a + b\ln r$	7.82	- 0.336	0.634

注：成都市的 $r=1$

表 2 1982 年与 1990 年 17 个区域的回归结果， $D_r = a + b \ln r$

Tab. 2 Regression results for the 17 regions in 1982 and 1990, $D_r = a + b \ln r$

中心 城市	辖县 数目	1982			1990			1982 - 1990	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i> / <i>a</i>	<i>b</i> / <i>b</i>
济南	64	2014. 63	- 318. 20	0. 366	2167. 64	- 334. 42	0. 328	0. 08	0. 05
武汉	61	1231. 42	- 128. 20 ²	0. 059	1383. 74 ¹	- 129. 35 ³	0. 023	0. 12	0. 01
青岛	33	1479. 96	- 210. 88	0. 579	1676. 68	- 240. 72	0. 448	0. 13	0. 14
重庆	36	2128. 99	- 317. 76	0. 390	2459. 23	- 3720. 18	0. 330	0. 16	0. 17
成都	42	1815. 00	- 286. 39	0. 793	2107. 54	- 344. 51	0. 811	0. 16	0. 20
哈尔滨	26	1220. 20	- 213. 29	0. 814	1422. 63	- 253. 02	0. 807	0. 17	0. 19
沈阳	28	11731	- 2401. 27	0. 773	13755	- 2812. 72	0. 770	0. 17	0. 17
上海	51	14534	- 2857. 03	0. 416	17192	- 3384. 46	0. 402	0. 18	0. 18
石家庄	42	3024. 36	- 563. 08	0. 465	3618. 42	- 675. 18	0. 461	0. 20	0. 20
北京	74	2330. 72	- 363. 01	0. 200	2811. 56	- 443. 54	0. 206	0. 21	0. 22
郑州	100	4468. 11	- 799. 87	0. 413	5508. 94	- 993. 79	0. 403	0. 23	0. 24
徐州	38	2923. 32	- 522. 86	0. 648	3593. 79	- 646. 76	0. 640	0. 23	0. 24
长春	14	1075. 06	- 191. 22	0. 579	1346. 57	- 244. 95	0. 617	0. 25	0. 28
南京	51	9376. 39	- 1918. 22	0. 342	11706	- 2394. 99	0. 333	0. 25	0. 25
长沙	15	2891. 60 ¹	- 501. 26 ²	0. 269	3680. 99 ¹	- 637. 69 ²	0. 249	0. 27	0. 27
西安	78	1705. 32	- 275. 37	0. 597	2268. 60	- 376. 20	0. 561	0. 33	0. 37
合肥	13	1451. 70	- 228. 09	0. 549	1949. 25	- 329. 94 ¹	0. 585	0. 34	0. 45

注：¹置信水平为 0. 01；²置信水平为 0. 1；³没有显著性；其他，置信水平为 0. 001。

加，表示中心城市人口密度增加；斜率的加大（变陡），表明密度随着离城市的距离越远下降越快。也就是说，离中心城市近的县比边远的县不仅人口密度高，而且增长速度更快（见图 4、5）。分析 1982 年和 1990 年的普查数据，可以看出，这些靠近城市的地区，其人口的快速增长并不是由于这些地区人口的自然增长高，而是其他地区人口的大量迁入所致。这种区域“向心集聚”的趋势在我国等发展中国家很普遍。区域结构的变化有阶段性。城市化的初期阶段，农村人口迁往城郊，腹地人口增长速度落后于中心地区，甚至出现负增长，可以概括成区域“向心集聚”；城市化的后期，都市人口外迁，腹地人口增长会快于中心地区，可以概括成区域“离心分散”阶段。这两种形式在美国 20 世纪 90 年代都可找到^[4]。我国各地现阶段都处于“向心集聚”阶段。

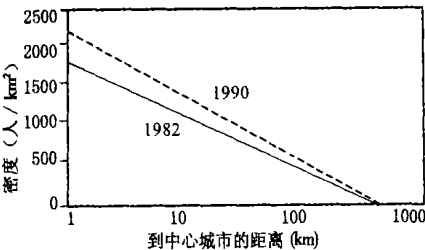


图 4 西安地区的增长模式

Fig. 4 Growth pattern in Xi'an region

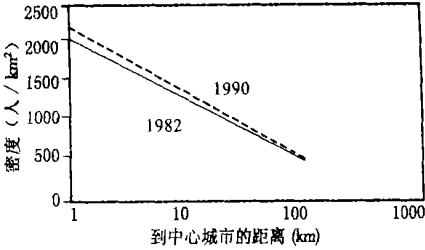


图 5 济南地区的增长模式

Fig. 5 Growth pattern in Jinan region

最后，这种“向心集聚”的程度在不同区域有所差别。定义“ a/a ”是截距 a 的变化率，“ b/b ”是截距 b 的变化率（绝对值）。表 2 中的最后两栏表明“ a/a ”和“ b/b ”具有正相关性。这意味着，如果一个区域的中心城市增长很快（ a/a 较大），那么这个区域的密度下降坡度更陡（ b/b 更大）。

为了更进一步解释这一现象，选取两个区域来说明：图 4 中，西安地区“ a ”和“ b ”的增长非常快；图 5 中，济南地区的“ a ”和“ b ”则变化较小。注意两图中的“到中心

城市的距离”(x轴)是以对数值为刻度。图4中,中心城市西安迅速增长,其腹地不同地区的增长速度相差悬殊。西安附近的地区增长非常显著,而距离西安边远的地区则增长迟缓。图5中,济南增长速度一般,其腹地的增长速度与其接近(尽管城市附近的地区增长速度仍然要稍高于远离城市的地区)。

合肥地区和长沙地区同西安地区的增长模式相似。从1982年到1990年,这些城市人口增长非常快,而其腹地的人口则增长较慢。合肥和长沙的人口本身具有相当规模,它们的迅速增长受益于它们分别是安徽和湖南两省的省会。西安的人口增长还得益于城市经济的发展。另外,青岛、重庆和沈阳同济南的增长模式相似。作为各自地区的老工业基地,这些城市的人口在80年代增长平稳;而它们的腹地,小城镇发展活跃。相比而言,这些区域向心集聚的趋势都不是很显著。其他区域的增长模式介于这两类之间。

6 结论

本研究基于GIS方法分析了我国区域人口密度分布模式,以及1982年到1990年区域增长的空间模式。同西方国家一样,我国区域人口分布呈现出距离城市越远,密度逐渐下降的特点。区域增长的基本模式是:离中心城市近的地区,人口增长快于边远的地区,呈现出向心集聚的趋势。但不同区域集聚程度不一样,中心城市人口快速增长的区域,腹地的人口增长比较迟缓;而中心城市人口增长速度一般的区域,腹地近乎同步增长。

要更深入地研究区域空间结构,需要居民收入或者生产力方面的数据。另外,利用更小地理单位的数据,可以深入地探讨区域空间结构的细节,特别是城近郊区。

参考文献:

- [1] Mills E S, Tan J P. A comparison of urban population density functions in developed and developing countries. *Urban Studies*, 1980, **17**: 313 ~ 321.
- [2] Clark C. Urban population densities. *Journal of Royal Statistics Society*, 1951, **114**: 490 ~ 494.
- [3] McDonald J F. Econometric studies of urban population density: a survey. *Journal of Urban Economics*, 1989, **26**: 361 ~ 385.
- [4] Berry B, Kim H. Challenges to the monocentric model. *Geographical Analysis*, 1993, **25**: 1 ~ 4.
- [5] Griffith D. Modelling urban population density in a multi-centered city. *Journal of Urban Economics*, 1993, **9**: 298 ~ 310.
- [6] Heikkila E, Gordon P, Kim J, Peiser R, *et al.* What happened to the CBD-distance gradient?: land values in a polycentric city. *Environment and Planning A*, 1989, **21**: 221 ~ 232.
- [7] Ladd H F, Wheaton W. Causes and consequences of the changing urban form: introduction. *Regional Science and Urban Economics*, 1991, **21**: 157 ~ 162.
- [8] Small K A, Song S. Population and employment densities: structure and change. *Journal of Urban Economics*, 1994, **36**: 292 ~ 313.
- [9] Mills E S. *Studies in the Structure of the Urban Economy*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1972.
- [10] Muth R. *Cities and Housing*. University of Chicago Press, Chicago, IL. 1969.
- [11] Beckmann M J. Von Thunen revisited: a neoclassical land use model. *Swedish Journal of Economics*, 1971, **74**: 1 ~ 7.
- [12] Wang F, Guldman J M. A spatial equilibrium model for region size, urbanization ratio, and rural structure. *Environment and Planning A*, 1997, **29**: 929 ~ 941.
- [13] Parr J B. A population density approach to regional spatial structure. *Urban Studies*, 1985, **22**: 289 ~ 303.
- [14] Barkley D L, Henry M S, Bao S. Identifying "spread" versus "backwash" effects in regional economic areas: a density functions approach. *Land Economics*, 1996, **72**: 336 ~ 357.
- [15] 孟向京, 贾绍凤. 中国省级人口影响因素的定量分析. *地理研究*, 1993, **12**(3): 56 ~ 62.
- [16] CIESIN (Center for International Earth Science Information Network). <http://sedac.cieson.org/chia>.
- [17] 顾朝林. 中国城市经济区划分的初步研究. *地理学报*, 1991, **46**(2): 129 ~ 141.

- [18] Berry B, Lamb R R. The delineation of urban spheres of influence : evaluation of an interaction model. *Regional Studies*, 1974, **8**: 185 ~ 190.
- [19] 杨齐. 区域客流分布模型的研究. *地理学报*, 1990, **45** (3) : 264 ~ 274.
- [20] Wang F, Y.-X. Zhou. Modelling urban population densities in Beijing 1982-1990: suburbanisation and its causes. *Urban Studies*, 1999, **36**: 271 ~ 287.

Analyzing regional density functions and growth patterns in China with a GIS-based method delineating influential regions of cities

WANG Fa-hui¹, JIN Feng-jun², ZENG Guang²

(1. Department of Geography, Northern Illinois University, De Kalb, USA;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract : Taking advantage of a GIS data set of county-level administrative regions and the National Population Census data in 1982 and 1990, this research analyzes the regional growth patterns in China through the change of regional density functions. To minimize the influence of physical environments on population densities, the study areas are limited to four major plains of China: the Northeast China, North China, Hubei-Hunan Plains and the Sichuan Basin. These plain areas are defined approximately according to cultivation ratios at the county level. A gravity-based model is used to delineate the influential regions of 17 cities. In other words, the influence of a city on a county is positively proportional to the city's population size but negatively proportional to the distance between them. A county is included in the influential region of a city if this city exerts the largest influence on the county among all surrounding cities. The model is implemented in a GIS environment. In China, regional densities decline with distance from a city, similar to western countries. Four simple bivariate functions are tested: (1) linear, (2) exponential, (3) reverse exponential and (4) power functions. Among the four functions, function (3) or $D_r = a + b \ln r$ fits the regional density patterns in China the best. This is different from urban density patterns, which are best captured by the (negative) exponential function. Based on the change of fitted density curves over time, regional growth patterns can be identified. The results show that in all 17 regions, areas close to central cities grew faster than remote areas, described as a trend of centralization. However, regions with strong core growth are generally associated with stagnant hinterlands; and regions with moderate core growth are usually matched by similar growth rates in the hinterlands. This indicates that most regions in China are still on the process of centralization, i. e., fast growth in core areas (urban and suburban) at the expense of peripheral areas. This trend is strongest in regions where the central cities have gained the fastest growth.

Key words : regional density functions; regional growth patterns; delineation of influential regions; GIS; China