

江苏城市体系规模结构与空间结构的分形特征

段七零

(扬州职业大学,江苏扬州 225012)

摘要: 运用分形模型,分析了江苏省城市体系的规模结构和空间结构。首位度指数表明,江苏城市体系规模分布已开始从首位型向序列型转变。Hausdorff 分形维数表明,规模结构仍相对松散,首位城市仍具一定垄断性但已不是绝对垄断地位。空间关联维数表明,江苏城市体系具有明显的交通轴线分布特征。牛犄维数比显示,江苏城市体系的交通网络通达性优良,各城市间联系较为紧密。集聚维数显示,江苏全省、南部区域、北部区域城市体系空间分布都呈集聚态;但南部区域已表现出一定程度的均匀分布格局,而北部区域的空间分布集聚程度却较高。在上述基础上,对江苏城市体系结构的优化提出了建议。

关键词: 城市体系;规模结构;空间结构;分形特征;江苏省

中图分类号: F129.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2363(2011)01-0069-05

城市体系的规模结构是指某区域内城市人口规模的层次分布状况,它反映城市体系从大到小的序列与规模的关系;而城市体系的空间结构是指区域内城市的空间分布状态与空间组合形式。2种结构的合理与否关系到区域内经济要素能否有机组合起来,并最终影响人类社会经济活动效益的高低。城市体系是一个非线性的复杂系统,其规模分布与空间分布都具有分形特征。分形的基本特性之一是无标度性,即没有特征尺度。因此,用一般测度无法准确描述城市体系的分形特征,需要借用分形维数去刻画。Mandelbrot 最早研究了城市规模分布的性质,Wong, Fotheringham 和 Frankhouser 等先后研究了城市体系的位序-规模法则以及 Pareto 分布与分维的关系,S. L. Arlinghaus 和 W. C. Arlinghaus 讨论了中心地体系的分维^[1]。国内艾南山、李后强等人做了开创性的工作^[2],刘继生、陈彦光等人在理论开拓、方法论和实证方面,进行了深入系统的研究^[3-4]。目前,城市体系分形研究已成为城市地理学的主要研究内容。省区是我国地理学研究的重要空间尺度类型之一,学者们研究了诸多省区的城市体系分形特征,但没有关于江苏省的研究。所以,研究江苏城市体系的分形特征,一方面为分形理论的运用提供新的实证案例,另一方面也为江苏城市体系的结构优化以及推进江苏区域协调发展提供一定依据。

1 研究区域概况

江苏省东濒黄海,西连安徽,北接山东,东南与浙

江、上海毗邻。全省面积 10.26 万 km²,占全国的 1.1%;2009 年末总人口 7 724.50 万人,占全国的 5.8%。江苏省位于我国侧“丌”型经济空间结构的结合部位,地理区位非常优越。江苏是我国经济发达省区,2009 年地区生产总值达 34 457.30 亿元,占全国的 10.1%;人均地区生产总值达 4.47 亿元,比全国水平高出 1.92 亿元。江苏省城镇化水平较高,2009 年达到 55.6%,比全国水平高出 9.0%。

2 研究方法

2.1 规模结构的研究方法

2.1.1 首位度指数。首位度(S_2)是指一个区域最大城市与第二位城市人口的比值,它反映了城市体系中人口在最大城市的集中程度。首位度大的城市规模分布就叫首位分布。为了改进首位度 2 个城市指数的简单化,又有人提出了 4 个城市指数(S_4)和 11 个城市指数(S_{11}),即

$$S_2 = P_1/P_2。$$

$$S_4 = P_1/(P_2 + P_3 + P_4)。$$

$$S_{11} = 2P_1/(P_2 + P_3 + \cdots + P_{11})。$$

式中: $P_1, P_2, P_3, \cdots, P_{11}$ 分别为按人口规模排在第 1, 2, 3, \cdots , 11 位的城市人口数量。按照位序-规模的原理,正常的 S_2 值应为 2, S_4 值和 S_{11} 值都应为 1。

2.1.2 规模分布的分形模型。对于一个特定区域,将城市人口数量从大到小排序,用人口尺度 r 来度量人口数量大于 r 的城市数目 $N(r)$,改变人口尺度 r 时,区域内的城市数目 $N(r)$ 也会随之改变,当 r 由大变小时, $N(r)$ 不断增多。在某个标度范围内, $N(r)$ 与 r 满足关系

$$N(r) \propto r^{-D}。$$

式中: r 为人口尺度; $N(r)$ 为人口数量大于 r 的城市数目。这是一个分形模型,其中 D 便是豪斯道夫

收稿日期: 2010-08-24; 修回日期: 2010-12-18
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40971112); 江苏高校哲学社会科学基金资助项目(08SJD7900058)
作者简介: 段七零(1970-),男,江苏扬州市人,副教授,硕士,主要从事区域差异与空间结构研究, (E-mail) duanqiling@yahoo.com.cn。

(Hausdorff) 分形维数。1949 年 G. K. Zipf 提出了一个通用的城市规模分布法则,即

$$P(a) = P_1/a^q。 \tag{5}$$

对式(5)两边取对数,可得

$$\ln P(a) = \ln P_1 - q \ln a。 \tag{6}$$

式(5),(6)中: a 为城市排序($a = 1, 2, 3, \cdots, n$); $P(a)$ 为排序为 a 的城市人口数量; P_1 为首位城市人口数量; q 为与区域条件和发展阶段有关的常数。Zipf 公式服从幂定律,具有分形意义。参数 Zipf 维数 q 与 Hausdorff 维数 D 互为倒数。

一般来说, D 值的大小具有明确的地理意义,直接反映了城市体系的规模结构。 $D < 1$, 表示该区域城市体系的规模结构比较松散,人口分布差异程度较大,首位城市的垄断性较强,城市体系发育还不成熟; $D = 1$, 说明该区域首位城市与最小城市的人口规模之比恰好等于区域内整个城市体系的城市数目,城市规模分布呈理想的“金字塔”型; $D > 1$, 表示该区域城市规模分布比较集中,人口分布比较均衡,中间位序的城市数目较多,整个城市体系发育比较成熟; $D \rightarrow 0$, 表示该区域只有一个城市; $D \rightarrow \infty$, 表示该区域内所有城市一样大,人口规模分布无差别。后 2 种极端情况在现实中一般是不存在的。

2.2 空间结构的研究方法

2.2.1 空间相关性的分形模型。城市体系的空间相关性分形研究一般采用空间关联维数来标度,公式如下^[5],即

$$C(b) = \sum_{i,j=1}^N H(b - d_{ij}), i \neq j。 \tag{7}$$

式中: b 为给定的距离标度; d_{ij} 为 i, j 两城市间的直线距离,即乌鸦距离(crow distance); H 为 Heaviside 阶跃函数,当 $d_{ij} \leq b$ 时 H 为 1,反之, H 则为 0; N 为两两城市的点对总数(本文中 N 为 820); $C(b)$ 为两城市间距离小于标度 b 的点对数目。如果城市体系的空间分布表现出分形特征,则应具有标度不变性,即

$$C(b) \propto b^E。 \tag{8}$$

式中: E 为乌鸦距离下的空间关联维数。空间关联维数的大小反映了城市之间的关联程度以及城市体系空间布局的均衡性。一般情况下,空间关联维数 E 在 0 ~ 2 之间变化。 $E \rightarrow 0$ 时,表示城市之间联系紧密,城市分布高度集中于一个地方(形成一个首位城市);当 $E \rightarrow 1$ 时,说明城市集中分布于一些直线上(一般是交通线上); $E \rightarrow 2$ 时,表示城市之间相互联系弱,城市布局分散到均匀的程度。

如果将式(7)中的 d_{ij} 改为两城市间的最近交通里程,即乳牛距离(cow distance),则可得交通距离下的空间关联维数 E' 。通常 E' 越接近于 E ,则表明各城市之间的连通性越好。刘继生等认为,用牛鸦维数比可更有效地反映城市体系的空间关联程度,其表达式为

$$Q = E'/E。 \tag{9}$$

式中: Q 为牛鸦维数比; E 和 E' 分别为乌鸦距离下和乳牛距离下的空间关联维数。牛鸦维数比是衡量各城市间交通网络通达性的指标,当 $Q > 1$ 时,表明交通网络通达性较差; Q 越接近 1,表明各城市之间越接近于直线式连通,交通网络通达性越好,城市间关联程度越高;当 $Q = 1$ 时,表明交通不受任何障碍的限制,这是一种理想状况,在现实社会中一般不存在。

2.2.2 集聚性的分形模型。集聚维数(半径维数)可以描述城市空间分布的自相似性。假定城市体系按某种自相似规则围绕中心城市呈凝聚态分布,且城市体系的分形体向各个方向均匀变化,则可借助几何测度关系确定半径 t 的圆周内城市数目 $N(t)$ 与半径的关系,即有 $N(t) \propto t^F$,式中 F 为分维。由于 t 取值影响分维数,故将其转化为平均半径,公式如下^[6],即

$$R \equiv (\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k l_i^2)^{1/2} >。 \tag{10}$$

分维计算公式为

$$R_k \propto k^{1/F}。 \tag{11}$$

式(10),(11)中: R_k 为平均半径; l_i 为第 i 个城市到中心城市的距离; k 为城市个数; $< >$ 表示求平均值; F 为集聚维数。 F 一般取欧氏维数为 2,如果 $F > 2$,则城市体系要素空间分布从中心向四周呈密度递增,城市体系空间分布呈漏斗离散态,这是一种非正常的情况;如果 F 接近于 2,则城市体系的要素分布在半径方向上是均匀变化的,城市体系空间分布基本上呈均匀态;如果 $F < 2$,则城市体系要素空间分布从中心向四周呈密度递减,城市体系空间分布呈集聚态,且 F 值越小,城市空间分布的集聚程度越大。

3 江苏省城市体系的分形特征

3.1 规模结构的特征

3.1.1 首位度指数。数据来源于江苏住房和城乡建设厅网站《江苏城市建设统计年报》和江苏统计局网站《江苏统计年鉴》(表 1)。根据式(1),(2),(3),得到江苏省城市体系的 S_2 值、 S_4 值、 S_{11} 值分别为 2.07,0.88,0.78。 S_2 值仍大于 2,说明仍有一定的首位分布倾向;但 S_2 已很接近 2,且 S_4 值和 S_{11} 值都已小于 1,这又表明江苏城市体系规模分布已开始从首位型向序列型转变,即属于过渡型分布。

3.1.2 规模分布的分形特征。根据规模分布的分形模型和表 1 数据,得到江苏城市规模分布的双对数坐标图(图 1)。模拟结果显示 $q = 1.137 3$,分维数 $D = 0.879 3$, $R^2 = 0.958 5$,相关性良好。 q 值虽然大于 1,但较接近于 1,是近似标准的 Zipf 式,表明江苏城市规模结构基本遵循 Zipf 定律,为相对较佳的一种分布结构。由于分维数 D 虽然接近于 1,但仍小于 1,表明江苏城市体系规模结构

表 1 江苏省城市规模排序表(非农业人口) 万人

Tab.1 Rank of urban population in Jiangsu Province 10⁴ people

城市	排序 a	人口数量 $P(a)$	城市	排序 a	人口数量 $P(a)$
南京	1	410.54	靖江	21	19.99
无锡	2	198.75	张家港	22	19.40
苏州	3	141.62	仪征	23	16.71
徐州	4	128.65	溧阳	24	15.60
常州	5	118.09	丹阳	25	15.54
淮安	6	89.39	新沂	26	15.23
南通	7	85.33	江都	27	15.12
扬州	8	79.06	海门	28	14.01
盐城	9	76.53	高邮	29	13.84
连云港	10	70.17	兴化	30	13.60
镇江	11	68.11	吴江	31	12.23
泰州	12	47.20	姜堰	32	11.70
宿迁	13	40.90	如皋	33	10.95
常熟	14	32.70	太仓	34	10.80
宜兴	15	32.13	大丰	35	10.34
江阴	16	23.87	启东	36	10.28
泰兴	17	22.19	金坛	37	9.70
昆山	18	22.12	句容	38	9.50
东台	19	22.05	通州	39	9.34
邳州	20	20.00	扬中	40	5.20

仍相对松散,人口分布差异程度还相对较大,首位城市南京在城市体系中仍具有一定的垄断性,但已不处于绝对垄断地位。

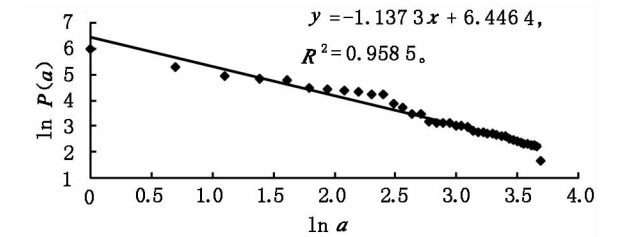


图 1 江苏省城市规模分布的双对数坐标图

Fig.1 Ln-ln plot of city-size distribution of Jiangsu Province

我们还根据图 1 中 $\ln P(a)$ 的数值,将其分为 6 个区间(表 2):人口大于 200 万人的只有 1 个(南京),人口 100~200 万人的城市也只有 4 个,50~100 万人的大城市 6 个,20~50 万人的中等城市 9 个,20 万人以下的小城市却占 50%。总体来说,与理想的“金字塔”型相比,目前,江苏大城市比重稍低,而中小城市比重稍大。所以,江苏城市体系规模结构仍需作进一步的调整。

3.2 空间结构的特征

3.2.1 空间相关性的分形特征。江苏 40 个城市间的乌

表 2 $\ln P(a)$ 区间值及其对应的人口数量、城市数目与所占比重

Tab.2 $\ln P(a)$, population number, city number and proportion of each range

$\ln P(a)$ 区间	1.65 ~ 2.27	2.27 ~ 3.00	3.00 ~ 3.85	3.85 ~ 4.49	4.49 ~ 5.29	5.29 ~ 6.02
人口数量/万人	5.20 ~ 9.70	10.28 ~ 19.99	20.00 ~ 47.20	68.11 ~ 89.39	118.09 ~ 198.75	410.54
城市数目/个	4	16	9	6	4	1
所占比重/%	10.0	40.0	22.5	15.0	10.0	2.5

鸦距离来源于搜狗地图网(<http://map.sogou.com>),公路交通里程来源于《江苏省公路里程地图册》(人民交通出版社,2008)。根据空间相关性的分形模型,我们取 20

km 的递增幅度作为给定的距离标度,则可得到乌鸦距离下的点 $(b, C(b))$ 和乳牛距离下的点 $(b', C(b'))$ (表 3),再绘制双对数坐标图(图 2)。

表 3 标度 b, b' 及其关联函数 $C(b), C(b')$

Tab.3 Yard stick b or b' , the correlative function $C(b)$ or $C(b')$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
b 或 b'	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
$C(b)$	44	87	151	226	304	392	454	510	568	598	640	661	686	703	723	739	756
$C(b')$	44	68	116	164	222	289	357	412	470	520	558	588	617	641	669	686	705
序号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
b 或 b'	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
$C(b)$	773	783	798	807	813	815	817	820									
$C(b')$	717	733	750	764	777	786	793	798	807	811	813	817	818	819	819	819	820

说明: b, b' 分别为乌鸦距离和乳牛距离的距离标度,单位为 km; $C(b), C(b')$ 分别为两城市间距离小于 b, b' 的点对数目。

由回归运算可知:乌鸦距离下的空间关联维数 $E = 0.8858$, 测定系数 $R^2 = 0.9364$ (图 2 中的线性 $\ln C(b)$);乳牛距离下的空间关联维数 $E' = 0.8381$, 测定系数 $R^2 = 0.9322$ (图 2 中的线性 $\ln C(b')$), 则牛鸦维数比 $Q = 0.9462$ 。空间关联维数 E 和 E' 都小于 1, 而且接近于 1, 说明江苏城市比较集中分布于主要交通线上,

如沪宁线、长江、东陇海线以及沿海高速等交通干线上, 空间结构具有明显的轴线分布特征。牛鸦维数比 Q 小于 1 且接近于 1, 表明江苏城市之间接近于直线式连通, 交通网络通达性优良, 各城市间联系较为紧密。

3.2.2 集聚性的分形特征。由于跨江通道的增多以及“沿江开发”战略已实施多年, 使得苏中和苏南的联系越

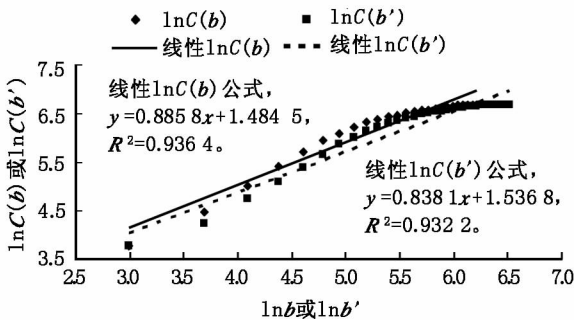


图 2 江苏省城市空间相关性的双对数图
Fig. 2 Ln-ln plot on urban spatial pertinence in Jiangsu Province

来越紧密,因此,这里将它们看成一个区域,称之为江苏南部区域,而苏北则称为江苏北部区域。为了更全面地刻画江苏城市体系的空间集聚程度,我们求出以下 3 个集聚维数:一是以南京为中心的江苏全省城市体系的集聚维数 $F_{全}$;二是以南京为中心的江苏南部区域城市体系的集聚维数 $F_{南}$;三是以徐州为中心的江苏北部区域城市体系的集聚维数 $F_{北}$ 。

限于篇幅,仅列出关于 $F_{全}$ 的计算过程。根据集聚性的分形模型,以南京为中心城市,按江苏全省各城市到南京的直线距离进行排序,并计算平均半径 R_k (表 4),再将点 (k, R_k) 绘成双对数坐标图。通过回归运算,求出集聚维数 $F_{全} = 1.7319$,测定系数 $R^2 = 0.9965$ (图 3 中的线性 $\ln R(k_1)$)。同理,得到集聚维数 $F_{南} = 1.7280$,测定系数 $R_1^2 = 0.9945$ (图 4 中的线性 $\ln R(k_1)$);集聚维数 $F_{北} = 1.0716$,测定系数 $R_2^2 = 0.9837$ (图 4 中的线性 $\ln R(k_2)$)。3 个集聚维数 F 值都小于 2,说明江苏全省、南部区域、北部区域城市体系要素空间分布都具有从中心向四周呈密度递减的规律,城市体系空间分布都呈集聚态;又由于 $F_{南}$ 值接近于 2,表明江苏南部区域城市体系要素分布从中心向四周的变化比较均匀,城市体系空间结构已经发展到较为高级阶段,表现出一定程度的均匀分布格局;而 $F_{北}$ 值比 $F_{南}$ 值低得多,只有 1.0716,说明江苏北部区域城市体系空间分布的集聚程度要比南部区域高得多。

4 结论与讨论

(1)首位度指数表明,江苏城市体系规模分布已开始从首位型向序列型转变,属于过渡型分布。Hausdorff 分形维数表明,规模结构仍相对松散,首位城市南京仍具一定垄断性,但已不处于绝对垄断地位。江苏城市体系规模结构的转型与江苏多年实施区域协调发展以及多中心联动发展有关,使得江苏各地区的中心城市都得到了较快发展。

(2)与理想的“金字塔”型相比,目前江苏大城市比重稍低,而中小城市比重稍大。所以,江苏城市体系规模结构仍需作进一步的调整。建议将南京发展为人口

表 4 南京为中心的江苏全省各城市平均半径
Tab. 4 Average radius from every city to Nanjing City in Jiangsu Province

城市	距离 l_i /km	城市个数 k /个	平均半径 R_k /km	城市	距离 l_i /km	城市个数 k /个	平均半径 R_k /km
南京	0	1	0.00	张家港	166	21	109.06
句容	41	2	28.99	东台	169	22	112.48
仪征	45	3	35.15	淮安	170	23	115.57
镇江	66	4	44.89	如皋	173	24	118.52
扬州	73	5	51.75	常熟	192	25	122.31
丹阳	76	6	56.52	苏州	193	26	125.77
金坛	84	7	61.21	盐城	194	27	128.94
江都	85	8	64.66	南通	196	28	131.92
溧阳	99	9	69.32	大丰	201	29	134.89
扬中	101	10	73.11	吴江	203	30	137.71
高邮	103	11	76.31	宿迁	213	31	140.77
常州	116	12	80.37	通州	217	32	143.76
泰州	118	13	83.87	昆山	220	33	146.66
泰兴	119	14	86.85	海门	227	34	149.64
宜兴	127	15	90.08	太仓	232	35	152.61
靖江	137	16	93.71	新沂	257	36	156.45
姜堰	138	17	96.88	邳州	258	37	160.04
兴化	139	18	99.68	启东	273	38	164.02
江阴	140	19	102.2	连云港	284	39	168.17
无锡	154	20	105.40	徐州	286	40	172.10

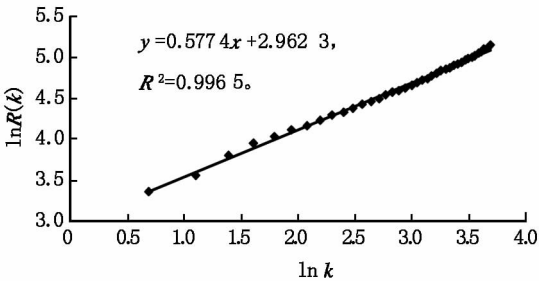


图 3 江苏全省城市体系集聚性的双对数图
Fig. 3 Ln-ln plot on the aggregation of urban system in Jiangsu Province

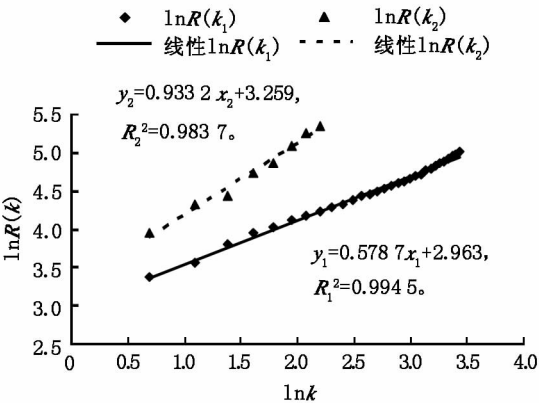


图 4 江苏南部区域与北部区域城市体系集聚性的双对数图
Fig. 4 Ln-ln plot on the aggregation of urban system in south region of Jiangsu and north region of Jiangsu

大于500万的超大城市,苏州、无锡发展为人口超250万的特大城市,南通、扬州、淮安、镇江、连云港、盐城培育成人口超100万的特大城市,泰州、宿迁、常熟、宜兴等发展为大城市,张家港、靖江、仪征、新沂等县级城市发展为中等城市。

(3)空间关联维数表明,江苏城市体系空间结构具有明显的轴线分布特征,较为集中于沪宁线、长江、东陇海线及沿海高速等交通干线上。牛鸦维数比显示,城市之间接近于直线式连通,交通网络通达性优良,各城市间联系较为紧密。建议江苏要注重从轴线到面域的城市布局。

(4)集聚维数显示,江苏全省、南部区域、北部区域城市体系要素空间分布都具有从中心向四周呈密度递减的规律,都呈集聚态分布。但也有差异:江苏南部区域城市体系空间结构已经发展到较为高级阶段,表现出一定程度的均匀分布格局;而北部区域城市体系空间分布的集聚程度却较高。所以,江苏在继续完善南部区域城市体系空间结构的同时,更要注重北部区域城市体系的结构优化:一要增加北部区域的城市数目,目前,江苏南部区域的城市密度高达6.389个/(万km²),而北部区域只有1.656个/(万km²);二要扩大北部区域的城市人口规模;三要关注北部区域城市的均衡布局。

(5)分形模型能够很好地揭示城市体系规模结构和

空间结构的总体演化过程,但难以揭示一个具体的城市在城市体系演化过程中的作用与机制。我国学者刘妙龙等人已将英国地理学家M. Batty创建的等级钟理论引入国内的实证研究^[7],这是我国城市地理学应加强研究的课题。

参考文献：

[1] 李传武,张小林,吴威. 基于分形理论的江苏沿江城镇体系研究[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(1):1-6.

[2] 李后强,艾南山. 具有黄金分割特征和分形性质的市场网络[J]. 经济地理,1992,12(4):1-5.

[3] 刘继生,陈彦光. 城镇体系等级结构的分形维数及其测算方法[J]. 地理研究,1998,17(1):82-89.

[4] 刘继生,陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法[J]. 地理研究,1999,18(2):171-178.

[5] 夏永久. 基于分形理论的皖江城市带城镇体系结构研究[J]. 资源开发与市场,2009,25(1):37-39.

[6] 尚正永,张小林. 长江三角洲城市体系空间结构及其分形特征[J]. 经济地理,2009,29(6):913-917.

[7] 刘妙龙,陈雨,陈鹏. 基于等级钟理论的中国城市规模等级体系演化特征[J]. 地理学报,2008,63(12):1235-1245.

Fractal Characteristics of Scale Structure
and Spatial Structure of Urban System in Jiangsu Province

Duan Qiling

(Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou 225012, China)

Abstract: By applying the fractal models, the paper analyzed the scale structure and spatial structure of Jiangsu's urban system. Urban primacy indexes show the scale distribution of Jiangsu's urban system began to transfer from the primary-city mode to the rank-scale mode. Hausdorff fractal dimension indicates the scale structure is still comparatively loose and the primary city of Nanjing is in fair monopoly but not in a position of absolute monopoly. According to the spatial correlation dimension, Jiangsu's urban system is obviously distributed along traffic lines. The ratio of cow dimension to crow dimension explains Jiangsu's urban system has excellent transport network accessibility and is in close contact. Three aggregation dimensions show the spatial distributions of the urban systems in Jiangsu Province, the south region of Jiangsu and the north region of Jiangsu are in aggregation, but the states of urban distribution in the south region of Jiangsu is in comparative equilibrium while that in the north region of Jiangsu is in fairly aggregation. Based on these conclusions, the paper presents some suggestions to optimize the structure of Jiangsu's urban system.

Key words: urban system; scale structure; spatial structure; fractal characteristic; Jiangsu Province