

文章编号: 1006-4710(2012)02-0240-07

# 基于分形理论的城市群最优空间结构模型与应用

赵璟, 党兴华

(西安理工大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 利用分形维数将城市群空间结构特征与城市群整体收益损耗联系起来, 建立包含投入、产出和人口规模等多因素空间分布分形特征的城市群最优空间结构模型, 明确城市群最优空间结构的经济内涵, 为城市群空间结构优化提供理论支撑。以陕西省关中城市群为例, 在利用城市规模效益对比检验模型有效性的基础上, 对比最优分形维数与 Zipf 维数演变趋势, 发现模型预测的空间结构优化方向与城市群空间结构 Zipf 维数等于 1 的优化标准并不相悖。

**关键词:** 城市群; 最优空间结构模型; 分形维数; 关中

**中图分类号:** F129, F293      **文献标志码:** A

## An Optimal Spatial Structure Model of Urban Agglomeration and Its Application Based on Fractal Theory

ZHAO Jing, DANG Xinghua

(Faculty of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The fractal dimension is used to connect the spatial structure features of urban agglomeration with the incomes and losses of urban agglomeration to establish the optimal spatial structure model of urban agglomeration characterized by multi-element spatial distribution including the inputs outputs and population scales, etc. So as to make clear the economic connotations of the optimal spatial structure model of urban agglomeration. With Guanzhong urban agglomeration in Shaanxi as the example, the contrast is made between the optimal fractal dimension and Zipf fractal dimension evolution trend on the basis of using the urban scale benefit comparison check model effectiveness. It has been found that the spatial structure optimization direction predicted by the model is in agreement with the optimization norms of Zipf dimension being equal to 1 of the spatial structure of urban agglomeration.

**Key words:** urban agglomeration; optimal spatial structure model; fractal dimension; Guanzhong

伴随着城市化进程的加速与新技术革命浪潮的涌现, 区域内城市间联系的强化与网络功能作用的加强都促使城市群这种城镇密集区的高级形态愈来愈成为产业和经济竞争的重要平台<sup>[1]</sup>。城市群空间结构是城市群内部所有社会经济组织方式及文化、生态观的具体地域表现形态, 并且其优化是促进城市群协调发展的重要内容。目前大量城市群规划(长三角规划、京津冀都市圈规划、山东半岛城市群规划、长株潭城市群规划, 等)指出, 城市群空间结构优化是规划的重要内容, 研究者纷纷设计优化路

径和对策建议<sup>[2]</sup>。但是理论界针对城市群空间结构演进的研究, 目前主要集中于通过分形维数描述其演进过程、特征与趋势, 定性分析如何调整其演进方向<sup>[3,4]</sup>, 提出相关的空间结构优化建议<sup>[5-6]</sup>, 少有文献分析城市群空间结构优化的标准及经济内涵。现有文献涉及空间结构优化时大都以城市群 Zipf 维数等于 1 或者在 1 附近为标准<sup>[7]</sup>, 但是该标准拥有明确的地理学意义却缺乏相应的经济内涵支撑。有些学者认为城市群内部城市规模分布 Zipf 定律只是一种统计规律, Zipf 分形维数是否等于 1 并不

**收稿日期:** 2011-12-05

**基金项目:** 教育部人文社会科学基金资助项目(09YJCZH097); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ9002); 陕西省软科学研究计划重点基金资助项目(2011KRZ05); 陕西省教育厅科学研究基金资助项目(11JK0171); 西安社会科学规划基金资助项目(12J33); 西安理工大学教学改革基金资助项目(107-002J04)。

**作者简介:** 赵璟(1982-), 男, 汉族, 湖北荆州人, 博士, 讲师, 研究方向为城市经济与区域经济。

E-mail: zjhanderson@yahoo.com.cn。

具有经济效率意义<sup>[8-10]</sup>。

基于决策层浓厚的调控情结与理论界的研究基础,本研究从经济内涵视角考察城市群空间结构优化的目标及途径,将城市群内部各城市的投入、产出和人口规模等多因素空间分布特征纳入城市群最优空间结构模型中,求解城市群整体经济效率最高的空间结构分形维数,为明晰城市群空间结构优化方向奠定理论基础;以陕西省关中城市群为例,通过城市规模效应对比检验所构建模型的适用性和有效性,发现空间结构优化方向与 Zipf 维数等于 1 的标准并不相悖,为城市群空间结构优化提供理论基础。

## 1 城市群最优空间结构模型建立

简单的分形体只有单一的标度可用一个维数描述,对于城市群这种复杂的系统,其构成要素不仅个数较多,而且在空间上的分布也很不均匀,所以单个维数无法刻画其总体特征<sup>[11]</sup>,因此本研究将城市群内部城市的投入、产出和人口规模等多因素空间分布分形特征纳入城市群最优空间结构模型,以更好地描述最优空间结构的经济内涵。

### 1.1 城市群空间结构多分形特征描述

针对城市群空间结构的分形特征,目前研究最多的是城市群内部城市规模分布(city-size distribution)的分形维数。假定一个城市群分布为若干聚落,由于城市与乡镇在理论上并无界线,可以设置一个人口尺度  $r$  进行度量,规定人口规模  $P \geq r$  的聚落为城市。在一定条件下,城市群内部城市数目与  $r$  满足负幂律关系,即著名的 Zipf 定律表达式:

$$P(k) = P_1 K^{-q} \quad (1)$$

式(1)中,  $K$  为城市序号数( $K=1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为城市群内部城市总数),  $P(k)$  是序号为  $K$  的城市人口数,  $P_1$  为首位城市的人口数,  $q$  为 Zipf 维数。当  $q > 1$  时  $P_1/P_n > N$ , 城市规模分布分散, 城市体系人口分布差异较大, 首位城市的垄断性较强; 当  $q < 1$  时  $P_1/P_n < N$ , 城市规模分布集中, 城市体系人口分布均衡, 中间位序的城市数量较多。因此, Zipf 维数的高低反映了城市群人口分布空间结构总体特征。目前欧美发达国家的城市规模分布维数多趋近于 1, 或在  $D=1$  上下波动; 而且世界范围内的城市规模分布维数也近似为 1。因此大量研究认为, 当 Zipf 维数接近于 1 时, 城市群内部等级结构表现和谐, 是城市群地理系统自组织演化的自然趋向<sup>[12-14]</sup>。但是人口规模只反映城市的一个特征, 城市群空间结构还可以由其内部城市社会经济总量等指标的空间

分布特征描述。根据城市群分形特征的研究进展<sup>[15]</sup>, 当一个城市群空间结构呈现出分形非退化特征时, 城市群内部各城市特征(如产值、土地等)与人口  $P$  之间满足:

$$M(k) = m[P(k)]^d \quad (2)$$

式(2)中  $M(k)$  表示城市  $k$  的某特征  $M$  的测度,  $\mu$  为比例系数。现假定某城市群有  $N$  个城市, 城市总人口为 1 单位, 这些人口以不同的比例在各城市分配时, 不违背 Zipf 定律, 由式(1)得:

$$\sum_{k=1}^N P(k) = P_1 \sum_{k=1}^N K^{-q} = 1 \quad (3)$$

由式(2)可得城市群中某特征  $M$  的总量为:

$$M = \sum_{k=1}^N M(k) = \mu \sum_{k=1}^N [P(k)]^d \quad (4)$$

将式(1)和式(3)代入式(4), 得:

$$M = \mu \sum_{k=1}^N (K^{-q/q} / \sum_{k=1}^N K^{-q})^d \quad (5)$$

由式(5)知,  $d > 1$  时  $M$  为  $q$  的增函数;  $d < 1$  时  $M$  为  $q$  的减函数;  $d = 1$  时  $M = \mu$  为常数。通过式(5)可以得到表征城市群空间结构的多个分形维数, 而且式(5)可以将描述城市群经济特征参数与城市群内部人口规模分布分形维数  $q$  联系起来, 便于城市群空间结构经济内涵的展开。

### 1.2 基于分形理论的城市群最优空间结构模型构建

城市群空间结构影响城市群内部社会经济活动的效率, 理论上城市群内部城市规模等级分布越均衡意味着城市群信息熵越大, 而城市规模等级分布越集中城市群内部引力熵越大。考虑到 Shannon 熵与 Hausdorff 维数的等价性<sup>[16]</sup>, 城市群空间结构达到最优(即其分形维数达到某一最优值)时, 城市群系统内部信息熵与引力熵总和最小。但目前针对城市群空间结构影响城市群内部社会经济活动效率的研究大都基于地理学背景, 并不深入分析城市群空间结构经济内涵, 造成了目前城市群空间结构优化研究大都以统计规律(Zipf 维数趋近于 1)为指导。因而为了进一步丰富城市群空间结构的经济内涵, 本研究将反映城市群各城市收益、损耗空间分布的分形特征与城市群人口规模分布分形特征联系起来, 建立一个城市群最优空间结构模型, 计算出满足城市群整体经济效率最高的城市群空间结构分形维数。

首先如果按照当年价格将描述城市群收益的各种指标(如工业增加值、第三产业增加值等)折算成币值, 则城市群现期总收益表述为:  $f_1(q) = \sum_{i=1}^n M_i$ ; 然后同样处理可得城市群总消耗(包括各种

社会经济活动需要的能耗、水耗和土地消耗等),即  $f_2(q) = \sum_{j=1}^m M_j$ 。从经济层面考虑城市群最优空间结构应满足城市群总收益减去总损耗之差最大,结合最大化的一阶条件可知求解最优空间结构分形维数的方程为:

$$f'_1(q) = f'_2(q) \quad (6)$$

根据式(6)可以求出最优空间结构的分形维数  $q^*$ , 即当城市群内部人口规模等级分布满足  $q^*$  的分形特征时,城市群的整体经济效益最好。虽然能表征城市群收益和损耗的指标个数很多,但是限于现实中城市层面数据的可获取性和连续性,本研究只选取城市群生产产值  $Y$ (即地区生产总值)表征城市群总收益,选取城市群土地成本  $S$ (即建成区土地面积)、用水成本  $W$ (即年生产、生活用水量之和)和用电成本  $Z$ (即年生产、生活用电量之和)表征城市群总损耗。当然,从经济层面上考虑城市群总收益还可以用工农总产值、非农产业增加值等指标,但是地区生产总值作为宏观经济学中最常用的复合指标无疑有更多的优势。从经济层面上考虑城市群总损耗还可以加入环境成本、污染治理费用等指标,但是这些指标在城市层面上搜集起来非常困难,并且统计口径不一,不利于模型的推广及检验。在模型中使用“城市市区非农业人口”表征城市总人口,虽然该指标是城市人口规模的偏小统计,但该指标的延续性好、“纯度”高,在国内统计出版物和城市研究中被广泛应用。将式(2)和式(4)进一步细化,可以得到度量城市群空间结构多分形特征的模型及参数,见表1。

表1 城市群空间结构多分形特征参数计算模型  
Tab.1 The multifractal characteristics calculation model of urban agglomerations spatial structure

关系变量	模型及其分形特征参数
$Y-P$	$Y = \mu_1 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_1}$
$S-P$	$S = \mu_2 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_2}$
$W-P$	$W = \mu_3 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_3}$
$Z-P$	$Z = \mu_4 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_4}$

结合表1对式(6)进一步细化可得城市群最优空间结构分形维数计算模型为:

$$\frac{d}{dq} [\mu_1 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_1} - \mu_2 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_2} - \mu_3 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_3} - \mu_4 \sum_{k=1}^N (P_1 K^{-q})^{d_4}] = 0 \quad (7)$$

针对公式(2),搜集城市群内部各城市的历年地区生产总值、非农业人口、建成区面积、总用水量和总耗电量数据,分别通过非线性拟合方法可以得到相应的  $\mu_i$  和  $d_i$  参数值,然后代入式(7),此时式(7)中只有一个未知数  $q^*$ ,通过解析法或者插值法求出最优分形维数  $q^*$ ,当城市群空间结构的分形维数  $q$  等于式(7)计算出的最优分形维数  $q^*$  时,该城市群的整体经济效率最高、空间结构最优。在现实中  $M$  表示建设用地等要素时  $d < 1$ ;当  $M$  表示产值、用水、耗能等要素时  $d > 1$ 。因此当城市群最优分形维数  $q^*$  较大时,整个城市群的总产值较大,城市总用地面积较小(用地节约),但是整个城市群的耗水、耗能也较大;反之,当城市群最优分形维数  $q^*$  较小时,城市群耗能、耗水减少,但总产值变小,总占地面积扩大。上述力量的相互作用使得城市群空间结构的分形维数不可能趋向极端,而是大致变化于  $0 \sim 3$  之间<sup>[17]</sup>。

通过式(1)可以计算出城市群内城市规模分布的 Zipf 维数值,将其与式(7)得出的最优分形维数  $q^*$  比较,即可从实际管理的角度明确城市群空间结构优化的方向为:若城市群实际 Zipf 维数  $> q^*$ ,则目前城市群内部城市规模分布太集中,首位城市的发展过快而其他成员城市与之差距太大,需要大力发展中小城市以减小 Zipf 维数值;若  $q^* >$  城市群实际 Zipf 维数,则目前城市群内部城市规模分布太平,首位城市的发展太慢,以至没有形成城市群内部的增长极,需要大力发展首位城市以增大 Zipf 维数值。而且根据不同年份的相关数据也可以利用插值法计算出多年的城市群最优空间结构分形维数。虽然单一年份的城市群最优空间结构分形维数值可以揭示在此年城市群内部城市规模分布应该如何调整才能促进城市群整体经济效率最优,但是通过观察多年的城市群最优空间结构分形维数变化趋势还可以得到更多的信息,也可以与城市群 Zipf 维数演变趋势相互比较,进一步深化对城市群空间结构优化的理解。

## 2 城市群最优空间结构模型应用

本研究以陕西省关中城市群为样本,利用前述模型求出 1996—2010 年关中城市群最优空间结构的分形维数,通过城市规模效应对比检验理论模型

的有效性,并对比最优空间结构分形维数演变过程与城市群 Zipf 维数演变过程,考察模型推导出的城市群空间结构优化方向与 Zipf 维数等于 1 的现行标准之间的关系。

## 2.1 关中城市群最优空间结构分形维数测算及演变

关中城市群位于陕西省中部、第二亚欧大陆桥陇海—兰新线中段,城市群内部各级城镇(主要城市包括西安、咸阳、铜川、宝鸡、渭南、兴平、韩城和华阴)沿陇海和西宝铁路及西潼高速、咸铜铁路、西铜高速、西韩铁路呈走廊—串珠状扩张。关中城市群是陕西省城镇发育最密集的地区,也是我国西部地区最具个性和活力的城市群之一,正在成为我国城

市建设与研究的重点区域。本研究采用的数据是 1996—2010 年关中城市群内部各城市地区生产总值、非农业人口、建成区面积、总用水量(年生产、生活用水量之和)和总耗电量(年生产、生活用电量之和),数据均来自 1997—2011 年的《陕西统计年鉴》和《中国城市统计年鉴》。

根据公式(2)所示的城市群空间结构分形特征计算模型,针对关中城市群内部各城市的非农业人口和表征城市经济收益与损耗的产值、占地、耗水和耗电相关数据,通过 SPSS17.0 进行非线性拟合分析,得到 1996—2010 年关中城市群空间结构的多分形特征维数,见表 2。

表 2 1996—2010 年关中城市群空间结构多分形特征  
Tab. 2 The multifractal characteristics of Guanzhong urban agglomeration in 1996—2010

年份	P-Y		P-S		P-Y		P-S	
	$\mu_1$	$d_1$	$\mu_2$	$d_2$	$\mu_3$	$d_3$	$\mu_4$	$d_4$
2010	29 578.221	1.201	1.845	0.899	732.621	0.978	5 983.214	1.192
2009	24 982.913	1.265	1.802	0.864	689.214	1.012	5 763.865	1.026
2008	21 387.605	1.192	1.756	0.856	677.268	0.995	5 548.231	0.995
2007	19 562.364	1.034	1.843	0.843	698.256	0.965	5 862.361	0.983
2006	24 594.326	1.026	1.674	0.852	576.326	0.924	4 836.594	1.036
2005	28 445.115	1.064	1.739	0.811	642.835	0.818	2 703.376	0.939
2004	18 575.019	1.106	1.787	0.848	513.390	0.750	5 087.209	0.941
2003	10 323.327	1.206	1.645	0.850	199.871	0.918	5 538.961	0.908
2002	7 997.246	1.217	1.473	0.861	152.875	0.960	3 880.811	0.961
2001	9 644.046	1.168	1.279	0.897	217.988	0.899	3 655.823	0.947
2000	13 714.706	1.100	1.227	0.909	244.800	0.872	2 360.680	1.017
1999	12 665.253	1.093	1.153	0.925	154.518	1.027	4 134.776	0.890
1998	13 577.855	1.065	1.450	0.860	194.646	0.964	4 913.401	0.834
1997	11 497.404	1.079	1.480	0.859	305.792	0.880	4 625.633	0.884
1996	13 215.663	1.019	1.286	0.879	173.342	1.004	6 416.788	0.791

将计算得出的 1996—2010 年关中城市群空间结构多个分形特征维数带入式(7),利用二分法进行试值,求出 1996—2010 年关中城市群最优空间结构分形维数,见表 3。二分法的基本算法为,公式(7)可以简写为已知函数  $f(q) = 0$ ,为了求出该函数的根(即最优空间结构分形维数  $q^*$ ),则:

1) 先找出一个区间  $[a, b]$ ,使得  $f(a)$  与  $f(b)$

异号,此区间内一定包含着方程式  $f(q) = 0$  的根;

2) 求该区间的中点  $m = (a + b)/2$ ,并算出  $f(m)$  的值;

3) 若  $f(m)$  与  $f(a)$  正负号相同则取  $[m, b]$  为新的区间,否则取  $[a, m]$  为新的区间;

4) 重复第 2) 和第 3) 步至理想精确度为止。

表3 1996—2010年关中城市群最优空间结构分形维数  
Tab.3 The optimal fractal dimension of Guanzhong urban agglomeration spatial structure in 1996—2010

年份	关中城市群最优空间结构分维
1996	1.425 8
1997	1.477 9
1998	1.493 4
1999	1.532 6
2000	1.574 7
2001	1.606 1
2002	1.734 6
2003	1.692 5
2004	1.621 2
2005	1.600 7
2006	1.587 2
2007	1.582 9
2008	1.552 1
2009	1.526 2
2010	1.476 5

根据表3可知,1996—2010年关中城市群最优

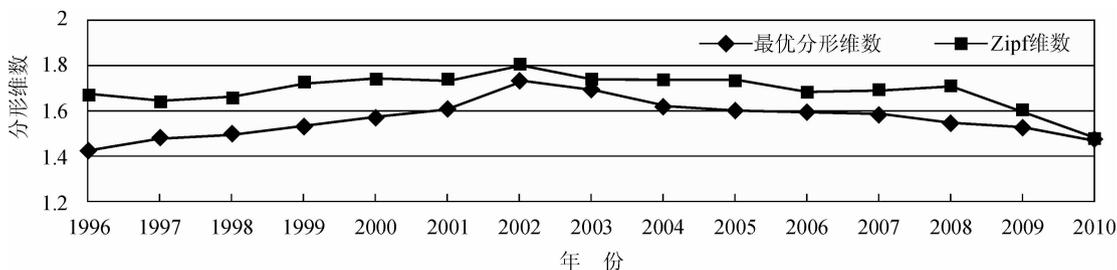


图1 1996—2010年关中城市群最优空间结构分形维数与Zipf维数比较

Fig.1 A comparison of the optimal fractal dimension and Zipf dimension of Guanzhong urban agglomeration spatial structure in 1996—2010

由于Zipf维数的演变趋势是描述城市群内部城市规模分布的现实特征,而最优空间结构分形维数描述的是假想达到城市群经济效率最优时的城市规模分布特征。根据图1的趋势对比,可以得出以下三个结论:

1) 关中城市群最优空间结构分形维数始终与关中城市群实际Zipf维数没有重合,说明现实中关中城市群内部城市规模分布并不是能满足城市群经济效率最大化的城市规模分布,虽然两者间差距在2008年之后开始不断缩小,但是数值上仍然没有重合;

空间结构分形维数的变化总体上呈先增大后减小的趋势,2002年达到极大值,而且计算出来的最优空间结构分形维数值均远大于1。从关中城市群最优空间结构分形维数的数值大小可知,1996—2010年间关中城市群内部首位城市西安的经济效率高于其他成员城市,而且其经济总量在城市群系统总量上占据比例较大,致使计算经济效率最优的城市群空间结构分形维数远大于1。而从数值演变趋势上看,1996—2002年间西安市的高经济效率仍然是促进整个城市群经济效率的主要贡献,促进了关中城市群最优空间结构的分形维数持续增大。在2003—2010年间关中城市群最优空间结构的分形维数开始降低,导致这种演变的原因可能是关中城市群内部其他成员城市的经济效率上升,也可能是其他成员城市经济总量占据城市群经济总量的比例增大。

将通过模型计算得到的1996—2010年关中城市群最优空间结构分形维数演变趋势与关中城市群Zipf维数的演变趋势进行对比,可以很清楚地发现关中城市群最优空间结构分形维数的演变趋势与Zipf维数的演变趋势非常相似,都呈现先上升后减小的趋势,见图1。特别是2008年后两类分形维数值的差距不断缩小。

2) 关中城市群最优空间结构分形维数始终小于关中城市群实际Zipf维数,这样的差距方向说明要从调整城市群空间结构角度优化关中城市群总体经济效率,还需要继续缩小关中城市群Zipf维数;

3) 1996—2010年关中城市群Zipf维数始终都比1大,对照Zipf值等于1的优化标准,关中城市群Zipf维数的演变向最优空间结构分形维数靠近的过程也就是其不断向1靠近的过程。因此本研究构建模型揭示的城市群最优空间结构演变方向与Zipf维数等于1的地理学标准并不相悖,为城市群空间结构优化的地理学标准增加了经济学内涵。

## 2.2 基于城市规模效益比较的最优空间结构模型检验

根据公式(7)和图1可知,关中城市群最优空间结构分形维数自2002年达到极大值后逐年减小,这说明相对于同样的城市群产出来看,城市群耗能、耗水相对量减少,但使用土地面积相对量增大。下面通过比较关中城市群不同规模等级城市2002年和2010年的规模效益,进一步检验基于经济效率最优的城市群最优空间结构模型的适用性和有效性。

根据公式(5)和公式(7),为使得关中城市群最优空间结构分形维数减小,从数值计算上需要缩小首位城市GDP、增大成员城市GDP、增大首位城市建成区面积、减小成员城市建成区面积、增大首位城市用水总量、减小成员城市用水总量、增大首位城市耗电总量并减小成员城市耗电总量。但是在城市实际发展过程中,各城市的土地使用面积、用水量和用

电量均是城市经济社会活动的结果,不能从行政层面简单地直接增加或者减少。因此根据模型2003—2010年关中城市群最优空间结构分形维数逐渐减小的主要原因来自于除中心城市以外成员城市GDP的快速增长,同时成员城市的土地、用电和用水使用效率快速提升。

党兴华通过比较关中城市群不同规模层级的城市相关指标,发现城市规模与集聚效应的一般关系为:城市规模越大,人均GDP表示的集聚效应越高。但城市规模越大,城市营运的成本也越高,城市规模越大,土地和空间利用越充分;反之,规模越小,土地相对占用量就越大[18]。下面根据《陕西省统计年鉴2003》、《陕西省统计年鉴2011》等有关资料,计算出2002年和2010年陕西省关中地区各级规模等级城市的经济效益情况(见表4)。

表4 关中城市群2002年、2010年不同规模等级城市效益比较

Tab. 4 A scale benefits comparison of different styles of cities of Guanzhong urban agglomeration in 2002 and 2010

指 标		规模等级/万人				
		< 10	10 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 200	> 200
人均年用电量/kWh	2002年	817.63	2 412.43	2 245.49	2 429.28	1 731.43
	2010年	2 260.99	5 114.02	3 330.78	1 758.45	2 827.85
	变化率/%	176.53	111.98	48.33	-27.61	63.32
人均用地/m <sup>2</sup>	2002年	58.14	35.35	42.71	71.2	37.6
	2010年	74.5	34.3	47.22	87.99	52.08
	变化率/%	28.14	-2.96	10.56	23.58	38.5
人均年用水总量/m <sup>3</sup>	2002年	233.98	44.82	70.3	102.55	55.82
	2010年	271.07	35.5	27.87	79.37	57.52
	变化率/%	15.85	-20.8	-60.36	-22.6	3.05
每平方米土地产出率/元	2002年	111.26	114.06	223.61	224.31	400.04
	2010年	98.16	172.82	424.02	461.39	942.98
	变化率/%	-11.77	51.52	89.62	105.69	135.72
人均GDP/元	2002年	4 200.01	4 032.26	9 551.13	15 971.82	15 040.41
	2010年	6 900.18	7 941.94	20 021.32	40 597.35	49 105.57
	变化率/%	64.29	96.96	109.62	154.18	226.49

资料来源:根据《陕西省统计年鉴2003》、《陕西省统计年鉴2011》和各城市统计年报有关数据运算得到,产出均按照当年价格计算,没有进行价格指数调整,城市的统计口径不包括市辖区。

根据表4可知:

1) 从人均产出和地均产出两个指标比较可知,2002年和2010年关中城市群特大城市和大型城市(西安、宝鸡、咸阳)的经济效率仍然比中小城市(市辖区人口小于50万)的经济效率高,而且在2002—2010年间人均产出和地均产出的增长率比较显示,大型城市经济效率的提升速度仍然比中小城市经济

效率的提升速度快,这些数值对比间接证实了在此期间关中城市群最优空间结构的分形维数应该大于1,这与模型计算结果相符。

2) 2002—2010年间关中城市群内部大中型城市(市辖区人口在30~100万之间)的人均用电量、人均用地和人均用水量增加幅度不大,部分城市还有所下降,总体来说这些城市增长幅度低于首位城

市和小城市的增长幅度;并且特大城市西安在人均用电量、人均用地和人均用水量方面确实较为节约,但是比较静态分析表明其在人均用地和人均用水量方面增长幅度却较快。这些数值对比解释了在此期间关中城市群最优空间结构分形维数不断缩小的趋势,这与模型计算结果相符。

### 3 结论

依托分形理论与方法,本研究构建了城市群最优空间结构模型,利用关中城市群数据进行了模型的应用研究,深入剖析了城市群空间结构优化的目标与经济投入产出效率之间的复杂关系,主要结论为:

1) 利用分形维数将城市群空间结构与城市群收益和损耗联系起来,建立包含投入、产出和人口规模等多因素空间分布分形特征的城市群最优空间结构模型。以关中城市群为例,定量分析了关中城市群最优空间结构分形维数自1996—2010年的演变过程,发现最优空间结构分形维数均大于1且呈先增大后减小的趋势;与关中城市群 Zipf 维数在此期间的演变进行对比分析,发现模型推导出的空间结构优化方向与城市群空间结构 Zipf 维数等于1的优化标准并不相悖,为城市群空间优化目标的制定及实施提供了理论支撑。

2) 利用城市规模效益比较检验了所构建城市群最优空间结构模型的有效性与适用性。研究成果有助于进一步增进对“如何实现城市群空间结构优化”的理解,而且所用方法也可用来考察国内其他城市群空间结构优化趋势以及全国范围内城市规模分布结构优化趋势,关于模型在空间尺度上的适用性问题,是下一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 姚士谋,陈振光,朱英明. 中国城市群[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006.
- [2] 吕斌,陈睿. 我国城市群空间规划方法的转变与空间管制策略[J]. 现代城市研究,2006,21(8):18-24.  
Lü Bin, Chen Rui. Approaches to space planning and regulation policy of urban agglomerations in China[J]. Modern Urban Research, 2006, 21(8): 18-24.
- [3] Dimou M, Schaffar A. Urban growth theories[J]. Revue d'Economie Politique, 2011, 121(2): 179-207.
- [4] Córdoba J C. On the distribution of city sizes[J]. Journal of Urban Economics, 2008, 63(1): 177-197.
- [5] 高鸿鹰,武康平. 集聚效应、集聚效率与城市规模分布变化[J]. 统计研究,2007,24(3):43-47.  
Gao Hongying, Wu Kangping. The agglomeration effect,

agglomeration efficiency and the change of city size distribution[J]. Statistical Research, 2007, 24(3): 43-47.

- [6] 赵璟,党兴华,王修来. 城市群空间结构演变-来自中国西部地区的经验证据[J]. 经济评论,2009,4:27-34.  
Zhao Jing, Dang Xinghua, Wang Xiulai. Spatial structure evolution of urban agglomeration-evidence from western China[J]. Economic Review, 2009, 4: 27-34.
- [7] Chen Yanguang, Zhou Yixing. Scaling laws and indications of self-organized criticality in urban systems[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2008, 35(1): 85-98.
- [8] Gan Li, Li Dong, Song Shunfeng. Is the Zipf law spurious in explaining city-size distributions[J]. Economics Letters, 2006, 92(2): 256-262.
- [9] González V R, Sanso N M. Gibrat's law for countries[J]. Journal of Population Economics, 2010, 23(4): 1371-1389.
- [10] González V R. The evolution of the US city size distribution from a long-run perspective (1900-2000)[J]. Journal of Regional Science, 2010, 50(5): 952-972.
- [11] Giesen K, Südekum J. Zipf's law for cities in the regions and the country[J]. Journal of Economic Geography, 2011, 11(4): 667-686.
- [12] Mansury Y, Gulyás L. The emergence of Zipf's law in a system of cities: an agent-based simulation approach[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2007, 31(7): 2438-2460.
- [13] Levy M. Gibrat's law for (all) cities: a comment[J]. American Economic Review, 2009, 99(4): 1672-1675.
- [14] Soo K T. Zipf's law and urban growth in Malaysia[J]. Urban Studies, 2007, 44(1): 1-14.
- [15] Duranton G. Urban evolutions: the fast, the slow, and the still[J]. American Economic Review, 2007, 97(1): 197-221.
- [16] 刘继生,陈彦光. 城市、分形与空间复杂性探索[J]. 复杂系统与复杂性科学,2004,1(3):62-69.  
Liu Jisheng, Chen Yanguang. Cities, fractals and spatial complexity[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(3): 62-69.
- [17] Puliafito J L. A transport model for the evolution of urban systems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(11): 2391-2411.
- [18] 党兴华,赵璟. 区域经济发展中城市体系分维研究-以陕西省关中地区为例[J]. 公共管理学报,2005,2(1):56-61.  
Dang Xinghua, Zhao Jing. Study on fractal dimension of size distribution of cities in the process of regional economic development a case study of Guanzhong area Shaanxi province [J]. Journal of Public Management, 2005, 2(1): 56-61.