

# 城市空间形状与碳排放强度的相关性研究

## ——基于我国 35 个城市的分析

王志远<sup>1</sup> 郑伯红<sup>2</sup> 陈祖展<sup>1</sup> (1. 南华大学设计与艺术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中南大学建筑与艺术学院, 湖南 长沙 410075)

**【摘要】**城市空间由于受地形地貌的影响,各个城市表现出不同的形状特征。城市空间形状可以从交通通勤、建筑布局等方面影响碳排放。因此,不同的城市空间形状有着不同的碳排放强度。研究首先基于 Boyce-Clark 方法对我国 35 个城市(直辖市、省会及副省级城市)2000 年和 2009 年建成区形状指数进行测算;再采用碳排放计算模型对 35 个城市建成区碳排放量进行计算,得到单位建成区面积碳排放强度;最后利用 Excel 软件分析城市空间形状与碳排放强度的耦合关系。根据两者相关性,提出低碳排放目标下的城市空间形状发展建议。

**【关键词】**城市空间形状;碳排放强度;相关性;发展建议;中国 35 个城市

**【中图分类号】**TU984.11+5 **【文献标识码】**A

相关研究表明,城市空间形状与碳排放存在着一定的相关性<sup>[1-4]</sup>。不同的城市空间形状有着不同的生态环境和碳排放效率。因此,定量测度城市空间形状特征及时空变化、碳排放特征及时空变化是非常有意义的,尤其是利用城市空间形状指数测算空间形态结构与碳排放的关系,研究不同的城市空间形状与碳排放强度之间可能存在的关联将更有现实意义,这不仅能揭示城市碳排放的特征,找到有利于碳减排的合理城市空间形状,直接为低碳城市规划的空间控制提供依据,为构建可持续发展的低碳城市模式和低碳城市规划体系提供参考。

### 1 样本选取、研究方法与数据来源

为使研究更具代表性和实证指导性,研究未采用空间形状模拟计算的方法,而是以我国 35 个城市为样本,因为这些城市表现出不同的空间形状,基本覆盖了空间形状的各种类型。

研究首先基于 Boyce-Clark 方法对我国 35 个城市(直辖市、省会及副省级城市)2000 年和 2009 年建成区形状指数进行测算;再利用碳排放计算模型,对各市碳排放量进行计算,得到单位建成区面

积碳排放强度;最后利用 Excel 软件分析城市空间形状与碳排放强度的耦合关系。

各城市建成区面积、人口数、人均 GDP、单位 GDP 能耗根据《中国城市统计年鉴》(2001、2010)整理计算得出。碳排放模型计算所需的建成区人口数按市辖区人口的 80% 计算,计算公式为:建成区人口 = 市辖区人口 × 80%;人均 GDP 按市辖区人均水平,计算公式为:人均 GDP = 市辖区 GDP / 市辖区人口;单位 GDP 能耗由于缺少部分统计数据,各城市均采用所在省的平均指标,计算公式为:单位 GDP 能耗 = 能源消费总量 / GDP,根据中国能源统计年鉴中数据计算得出。

### 2 城市空间形状特征及其时空变化

#### 2.1 城市空间形状的形状指数

对城市空间形状定量测度方法有多种,包括 Boyce 和 Clark 在 1964 年提出的半径形状指数<sup>[5]</sup>, Moellering 和 Rayner 利用傅里叶变换方法计算图形的形状指数<sup>[6]</sup>, Medda 和 Nijkamp 等基于形状要素功能(shape membership function)测算形状指数的方法<sup>[7]</sup>等,这些方法各有特点,但根据现有研究成果,大多认为 Boyce-Clark 形状指数方法<sup>①</sup>测算结果较其他方法准确,能够更好地反映城市形状的轮廓特征。

基金项目:湖南省科技计划项目“生态文明视角下城市空间低碳化模式”(课题编号:2013SK3116)

城市空间形状不同具有不一样的形状指数。根据王新生等人的研究成果,利用 Boyce-Clark 方法计算 15 种标准图形(图 1)的形状指数(取  $n = 32$ ),其结果为:最紧凑的形状圆形有最小的形状指数值 0.000,较紧凑的形状正八边形(形状指数约 2.000)、菱形(9.656)、正四边形(9.658)次之,接下来依次是紧凑性较差的方状矩形(约 30.000)和具有凹凸特征的星形(34.852)、H 形(49.706)、长条矩形(59.880)、X 形(66.366)以及带状矩形(90.851)和线状矩形(约 100.000)等,直线的形状指数最高,达到 187.500<sup>[8]</sup>。

### 2.2 基于 Boyce-Clark 方法测度的我国 35 个城市形状特征及时空变化

选定我国 35 个城市作为研究对象,对它们分别进行形状指数测算。所使用的图形数据通过 Google earth 遥感影像图提取,经过图片加工处理,得到各市建成区的空间平面轮廓示意图(图 2 图 3)。

根据表 2、图 4 可看出,各城市 2000 年到 2009 年建成区面积都有不同程度的增大。其中,增长较

为明显的有北京、重庆、南京、广州、深圳等城市。

根据 2000 年和 2009 年各城市建成区的空间平面轮廓和建成区面积,利用 Boyce-Clark 形状指数方法,测算得到各城市的城市形状指数(表 2)。

2000~2009 年,35 个城市中有 20 个城市建成区形状指数是下降的,15 个城市形状指数是上升的,说明更多的城市形状发展更为规整紧凑,但也有部分城市随着城市新区开发建设,呈组团式多中心发展,城市形状更为零散,外延式扩张比较明显。

## 3 城市碳排放特征及其强度变化

### 3.1 计算模型

本研究采用中国科学院可持续发展战略研究组的碳排放模型对碳排放量进行计算,其是根据 Kaya 碳排放恒等式修改建立的适合中国国情的碳排放计算模型<sup>[9]</sup>。

改进后的计算模型为:

城市能耗碳排放主要来源于建筑、交通、工业生产等方面,求证不同能源使用与 CO<sub>2</sub> 排放量之间

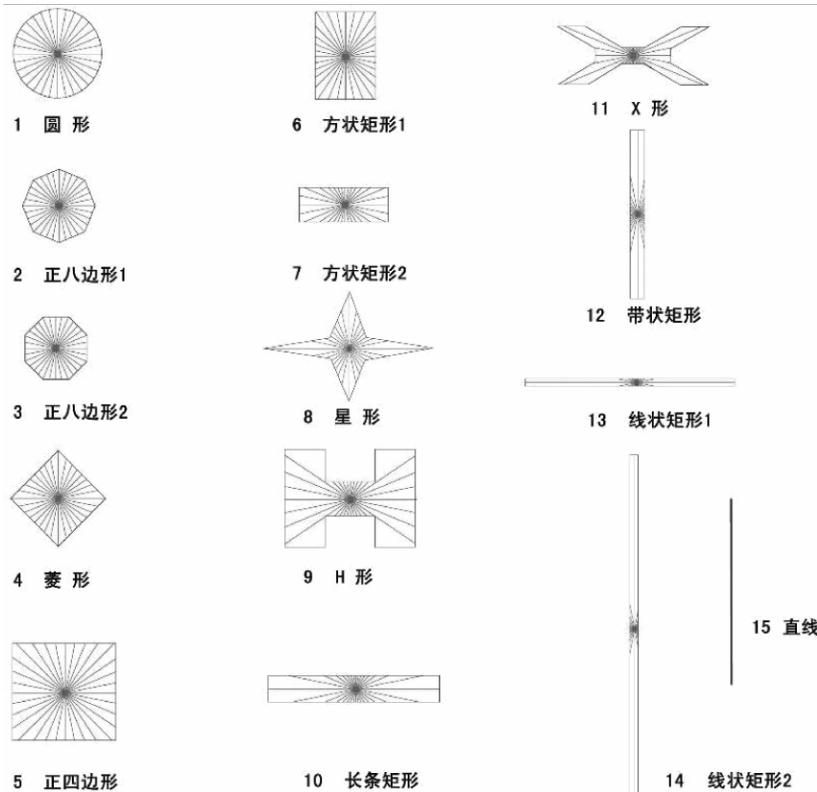


图 1 城市空间形状的 15 种标准图形

资料来源:根据王新生(2004)《若干空间分析方法及应用于城市空间形态研究》绘制

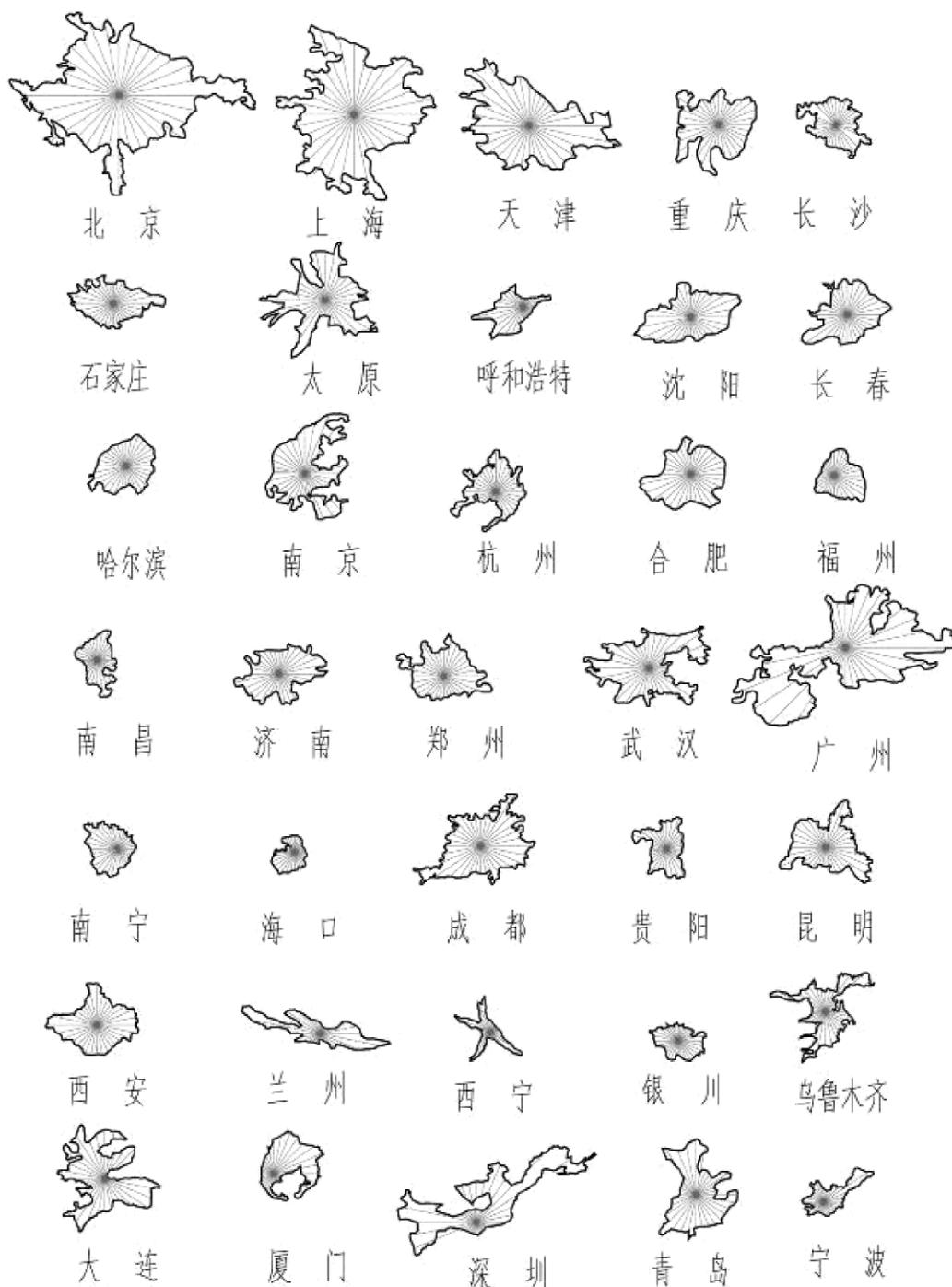


图2 2000年我国35个城市建成区空间平面轮廓示意图  
资料来源: 根据 Google earth 遥感影像图绘制

的关系, 采用系数法公式表示如下:

$$CO_2 = K \times E$$

其中: E 为不同类型能源使用量, 可按标准统一折算为标准煤; 系数 K 为碳排放强度。在不同的技术水

平, 不同国家、地区及能源构成下, 系数 K 值不同。在研究过程中, 为简便繁琐折算, 假定 K 值恒定。目前中国采用较多的“能源燃料折算标准煤后 CO<sub>2</sub> 排放系数”为 2.42 ~ 2.72, 这里采用燃烧 1 吨标准

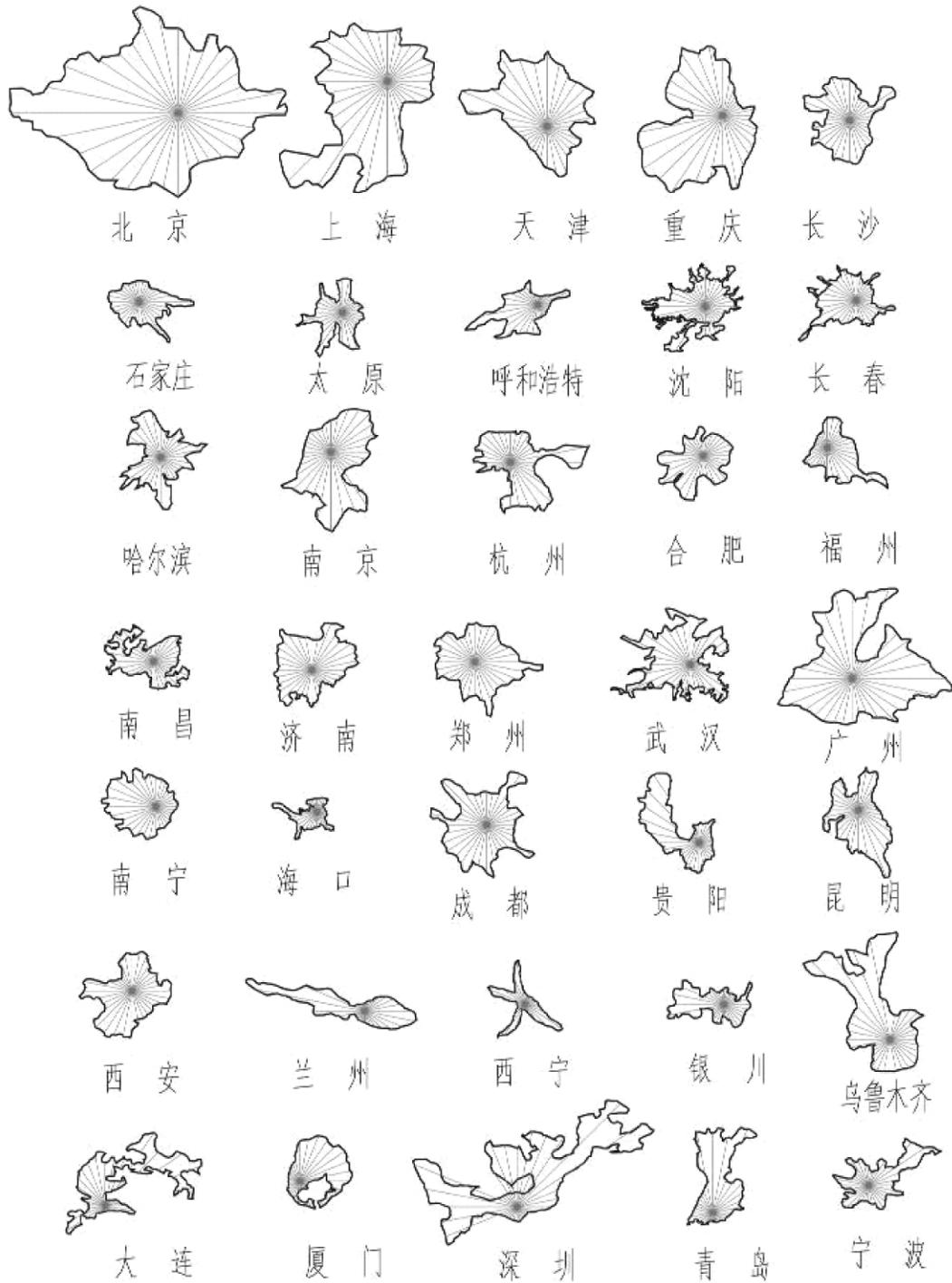


图3 2009年我国35个城市建成区空间平面轮廓示意图

资料来源: 根据 Google earth 遥感影像图绘制

煤排放 2.45 吨 CO<sub>2</sub><sup>[10]</sup>。

城市 CO<sub>2</sub> 排放总量计算用人口总数、人均 GDP

指标、单位 GDP 产出的能耗量及 CO<sub>2</sub> 与能源的换算

比(K) 来获得, 公式表示如下:

$CO_2$  排放量 =  $P \times (GDP/P) \times (E/GDP) \times (CO_2/E)$

其中: P 为城市人口数; E 为能耗。

### 3.2 碳排放量计算及其强度变化

利用上述计算模型,对各城市 2000 年、2009 年碳排放量进行计算,得出各城市碳排放量;再根据建成区面积计算得到单位土地面积碳排放强度(表 1)。

通过表 1 和图 5 可以看出,2000 ~ 2009 年,我国 35 个城市碳排放量随着社会发展,各城市  $CO_2$  排放量都呈上升趋势;而建成区单位面积碳排放量有升有降,其中 28 个城市单位面积碳排放量是上升的,7 个城市是下降的。这主要也与建成区面积扩张有关。

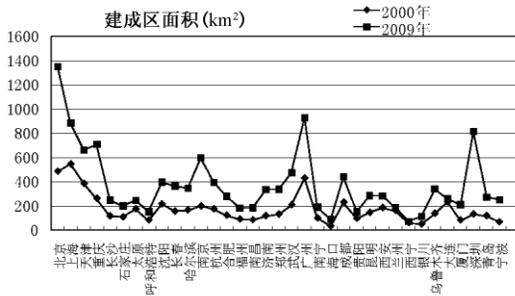


图 4 我国 35 个城市 2000 年、2009 年建成区面积对比图

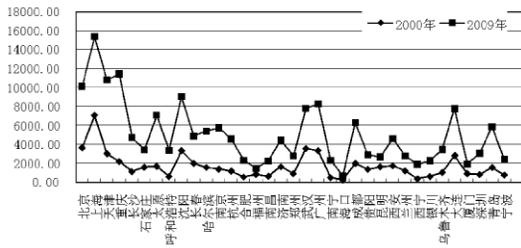


图 5 我国 35 个城市 2000 年、2009 年碳排放量对比图

## 4 城市空间形状与碳排放强度的相关性分析

2000 年和 2009 年 35 个城市建成区的形状指数有 20 个是下降的,15 个是上升的;而建成区单位面积碳排放量有 28 个城市是上升的,7 个城市是下降的。

从表 2 和图 6、图 7 可看出,2000 ~ 2009 年 35 个城市整体表现为城市空间形状指数下降,而单位土地面积碳排放量上升。说明城市空间形状发展越

为规整紧凑,而城市单位面积碳排放量由于社会经济处于城市化、工业化中后期阶段,碳排放量呈上升趋势。

从 2000 年和 2009 年城市空间形状与碳排放强度的相关关系分析(图 8、图 9)可看出,城市空间形状指数与单位土地面积碳排放量表现出正线性相关对应关系,即城市空间形状指数越大,单位土地面积碳排放量越多,说明城市空间形态越不规整,单位土地面积碳排放量越大。因此,减小城市形状指数,规整紧凑型发展,对降低城市单位面积碳排放量具有重要意义。

## 5 低碳排放目标下的城市空间形状发展建议

### 5.1 减小城市空间形状指数 精明增长

城市空间形状与城市碳排放息息相关,减小城市空间形状指数是城市可持续发展理念降低碳排放,实现精明增长的有效手段,可以提高城市空间资源的利用效率,达成空间能效的整体提升。主要包括三个方面策略:①城市结合地形地貌条件规整型开发;②城市高效利用土地资源;③城市高效构建与优化景观生态网络。

### 5.2 限定城市空间无序扩张 内涵型发展

通过提高土地混合利用(mixed land use)、城市旧区更新(urban revitalization)、棕地改造(brown field transformation)、景观生态格局(landscape ecological pattern)等与  $CO_2$  减排相关的规划手段,应对城市气候变化的城镇建设用地空间无序扩张,优化城镇建设用地结构和布局,注重内涵型发展,避免高能耗、低效率的外延型发展。

### 5.3 提高城市空间紧凑程度 集约发展

紧凑城市作为一种城市可持续发展理念,对我国城市化进程加快发展过程中解决用地紧张、资源环境矛盾突出等问题具有重要的指导意义。快速城市化时期城市空间应高效集约用地,谨防“摊大饼”城市空间紧凑化发展。在城市分区层面完善城市社区功能,使社区功能复合化,多元化满足居民需要,减少居民的长距离出行的必要,以合理的步行距离为半径尺度设立社区综合服务中心。有利于减少城市通勤距离,从而减少能源消耗,降低碳排放。

表 1 我国 35 个城市碳排放量及单位建成区面积碳排放强度

城市	2000 年					2009 年				
	人口数 (万人)	人均 GDP (万元)	单位 GDP 能耗 (吨标准煤/ 万元)	碳排放量 (万 t)	单位土地 面积碳排 放量(万 t/km <sup>2</sup> )	人口数 (万人)	人均 GDP (万元)	单位 GDP 能耗 (吨标准 煤/万元)	碳排放量 (万 t)	单位土地 面积碳 排放量 (万 t/ km <sup>2</sup> )
北京	779.3	2.39	0.80	3650.55	7.48	939.7	7.25	0.606	10115.00	7.49
上海	909.5	3.61	0.88	7078.78	12.87	1065.3	8.10	0.727	15369.42	17.35
天津	545.6	2.04	1.11	3026.87	7.84	642.3	8.21	0.836	10800.74	16.32
重庆	717.2	0.88	1.42	2195.72	8.38	1234.2	3.20	1.181	11427.51	16.14
长沙	140.3	2.37	1.40	1140.51	9.58	192.8	8.30	1.202	4712.55	18.93
石家庄	133.4	2.50	1.96	1601.47	14.30	194.2	4.41	1.640	3441.10	17.12
太原	186.6	1.26	2.95	1699.30	9.60	228.1	5.35	2.364	7067.94	28.85
呼和浩特	85.0	1.17	2.48	604.26	7.28	95.0	7.16	2.009	3347.98	21.74
沈阳	388.0	1.93	1.83	3357.42	15.47	409.8	6.26	1.439	9044.26	22.90
长春	234.3	2.11	1.65	1998.50	12.57	289.9	5.68	1.209	4877.41	13.36
哈尔滨	243.0	1.81	1.46	1573.27	9.36	379.8	4.78	1.214	5399.68	15.65
南京	231.6	2.68	0.92	1399.03	6.96	436.8	7.04	0.761	5733.32	9.59
杭州	143.3	3.78	0.90	1194.39	6.75	343.6	7.33	0.741	4572.37	11.63
合肥	107.7	1.75	1.21	558.73	4.47	166.9	5.58	1.017	2320.48	8.29
福州	118.8	3.13	0.94	856.36	9.31	149.9	4.90	0.811	1459.43	7.98
南昌	136.2	1.82	1.06	643.75	7.57	178.0	5.89	0.880	2260.39	12.15
济南	211.6	2.50	1.28	1658.94	13.82	278.6	6.05	1.072	4426.88	13.18
郑州	175.2	1.57	1.38	929.99	6.99	228.0	4.30	1.156	2776.69	8.24
武汉	599.4	1.61	1.51	3570.14	17.00	412.0	6.28	1.230	7797.01	16.41
广州	453.3	3.82	0.79	3351.52	7.78	523.7	9.42	0.684	8267.15	8.92
南宁	108.5	1.59	1.22	515.65	5.16	213.7	4.16	1.057	2302.18	12.12
海口	45.9	2.33	0.92	241.06	7.09	126.6	2.63	0.850	693.39	7.62
成都	268.7	1.99	1.53	2004.37	8.68	416.7	4.61	1.338	6297.19	14.34
贵阳	149.5	1.15	3.25	1368.95	13.97	175.0	2.87	2.348	2889.24	18.76
昆明	168.6	2.29	1.73	1636.46	11.06	200.2	3.66	1.495	2683.81	9.42
西安	314.8	1.53	1.48	1746.44	9.34	449.3	3.58	1.172	4618.63	16.32
兰州	145.2	1.49	2.26	1197.92	7.35	168.4	3.59	1.864	2760.89	15.00
西宁	75.3	0.67	3.07	379.47	6.22	91.3	3.14	2.689	1888.68	25.87
银川	51.3	1.18	4.14	614.00	12.79	73.1	3.67	3.454	2270.24	19.74
乌鲁木齐	118.8	1.73	2.11	1062.46	7.59	185.5	3.92	1.934	3445.50	10.16
大连	214.2	2.95	1.83	2833.08	12.11	241.6	9.11	1.439	7759.65	30.08
厦门	105.0	3.82	0.94	923.73	11.27	141.6	6.89	0.811	1938.52	9.14
深圳	99.9	4.33	0.79	837.23	6.16	196.8	9.28	0.684	3060.52	3.76
青岛	187.7	2.68	1.28	1577.52	13.26	220.4	10.11	1.072	5852.26	21.44
宁波	99.2	3.52	0.90	769.95	11.16	177.5	7.50	0.741	2416.82	9.63

数据来源: 根据《中国城市统计年鉴(2001、2010)》整理 碳排放量根据 1 部分所述方法计算得出。

表 2 城市建成区面积、空间形状指数与单位面积碳排放强度

城市	2000 年			2009 年		
	建成区面积 (km <sup>2</sup> )	形状指数	单位土地面积 碳排放量(万 t)	建成区面积 (km <sup>2</sup> )	形状指数	单位土地面积 碳排放量(万 t)
北京	488	15.311	7.48	1350	10.281	7.49
上海	550	19.124	12.87	886	14.953	17.35
天津	386	16.789	7.84	662	21.067	16.32
重庆	262	17.482	8.38	708	15.905	16.14
长沙	119	21.768	9.58	249	19.095	18.93
石家庄	112	13.484	14.30	201	11.679	17.12
太原	177	27.503	9.60	245	23.870	28.85
呼和浩特	83	31.761	7.28	154	45.983	21.74
沈阳	217	22.620	15.47	395	25.086	22.90
长春	159	13.916	12.57	365	11.873	13.36
哈尔滨	168	12.975	9.36	345	15.146	15.65
南京	201	36.094	6.96	598	31.863	9.59
杭州	177	25.591	6.75	393	28.755	11.63
合肥	125	14.621	4.47	280	20.653	8.29
福州	92	21.082	9.31	183	25.671	7.98
南昌	85	28.970	7.57	186	30.431	12.15
济南	120	18.632	13.82	336	17.972	13.18
郑州	133	12.687	6.99	337	13.540	8.24
武汉	210	54.331	17.00	475	42.673	16.41
广州	431	51.334	7.78	927	48.656	8.92
南宁	100	17.630	5.16	190	14.743	12.12
海口	34	23.512	7.09	91	43.106	7.62
成都	231	14.144	8.68	439	11.437	14.34
贵阳	98	55.221	13.97	154	51.390	18.76
昆明	148	25.530	11.06	285	19.887	9.42
西安	187	13.941	9.34	283	16.343	16.32
兰州	163	58.435	7.35	184	67.073	15.00
西宁	61	65.321	6.22	73	67.752	25.87
银川	48	33.648	12.79	115	28.561	19.74
乌鲁木齐	140	37.893	7.59	339	21.657	10.16
大连	234	116.398	12.11	258	86.580	30.08
厦门	82	85.322	11.27	212	56.343	9.14
深圳	136	23.536	6.16	813	31.427	3.76
青岛	119	36.044	13.26	273	37.579	21.44
宁波	69	63.524	11.16	251	54.526	9.63

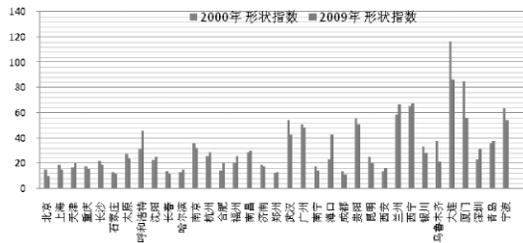


图 6 我国 35 个城市 2000 年、2009 年建成区形状指数对比图

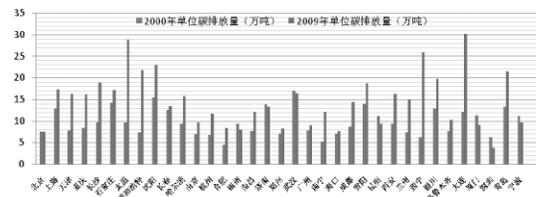


图 7 我国 35 个城市 2000 年、2009 年建成区单位面积碳排放量对比图

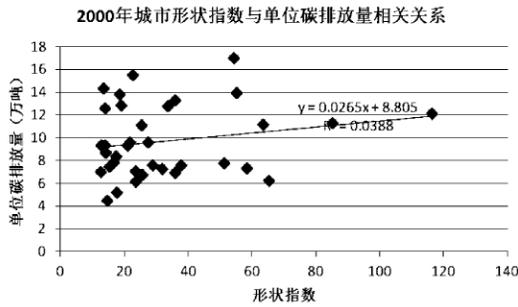


图 8 2000 年城市空间形状与碳排放的相关关系

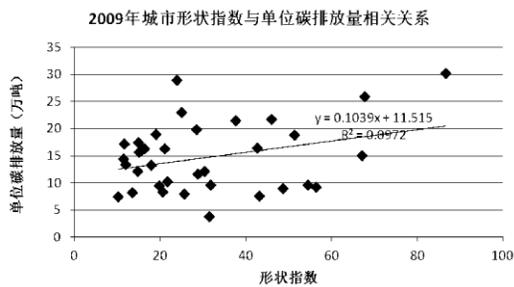


图 9 2009 年城市空间形状与碳排放的相关关系

【注释】

①Boyce-Clark 形状指数方法( Boyce and Clark shape index method) 的内涵是基于半径的测度, 将研究城市的边界形状与标准圆形作对比, 得到一个相对指数, 也称为半径形状指数。其计算公式为:

$$SBC = \sum_{i=1}^n \left| \left[ \left( r_i / \sum_{i=1}^n r_i \right) \cdot 100 - \frac{100}{n} \right] \right|$$

式中: SBC 是 Boyce-Clark 形状指数,  $n$  为图形内具有同等角度辐射半径的数量,  $r_i$  是从图形的优势点( vantage point) 到图形边缘的半径长度。其中城市形状的优势点可以是城市形状的形心( Centroidlabels) 或者 CBD 中心。

【参考文献】

[ 1 ] Fong Wee-Kean, Hiroshi Matsumoto, Ho Chin-Siong, et al. Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission Considerations In the Urban Planning Process in Malaysia [J]. *Journal of the Malaysian Institute of Planners* 2008( 6) : 101 – 130.

[ 2 ] Ewing R, Rong F. The Impact of Urban Form on U. S. Residential Energy Use [J]. *Housing Policy Debate* 2008, 19( 1) : 1 – 30.

[ 3 ] 吕斌. 城市空间形态的环境绩效与低碳城市形成的规划路径 [A] // 中国地理学会. 中国地理学会百年庆典学术论文摘要集 [C]. 2009: 85.

[ 4 ] 周潮, 刘科伟, 陈宗兴. 低碳城市空间结构发展模式研究 [J]. *科技进步与对策* 2010, 27( 22) : 56 – 59.

[ 5 ] Boyce R R, Clark W A V. The concept of shape in geography [J]. *The Geographical Review* 1964, 54: 561 – 572.

[ 6 ] Moellering H, Rayner J N. The dual axis Fourier shape analysis of closed cartographic forms [J]. *The Cartographic Journal*, 1982, 19( 1) : 53 – 59.

[ 7 ] Medda F, Nijkamp P, Rietveld P. Recognition and classification of urban shapes [J]. *Geographical Analysis* 1998, 30 ( 3) : 304 – 314.

[ 8 ] 王新生, 刘纪远, 庄大方, 等. 中国特大城市空间形态变化的时空特征 [J]. *地理学报* 2005, 60( 3) : 392 – 400.

[ 9 ] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2009 中国可持续发展报告: 探索中国特色的低碳道路 [M]. 北京: 科学出版社. 2009: 8 – 10.

[ 10 ] 碳排放量的计算方法及与电的换算公式 [EB/OL]. 中国节能产业网. <http://www.hpnet.com.cn>. 2009 – 12 – 10.

作者简介: 王志远( 1985 – ), 男, 湖南湘潭人, 硕士, 南华大学设计与艺术学院城市规划专业教师。主要研究方向: 低碳城市与城市空间。

收稿日期: 2013 – 03 – 12

## Study of Correlation of Urban Space Shape and the Carbon Intensity: Based on analysis of 35 cities in China

WANG Zhiyuan, ZHENG Bohong, CHEN Zuzhang

**【Abstract】** The urban space affected by the topography of the various cities show different characteristics of the shape. Urban space shape of the impact of carbon emissions from commuting, construction layout, the shape of the urban space has a different carbon emission intensity. First, based on the method of Boyce-Clark shape index of the built-up area of 35 Chinese cities ( municipalities, provincial capitals and sub-provincial cities) in 2000 and 2009 estimates; carbon calculation model built in 35 cities of China District carbon emissions has been calculated, the unit built area of carbon emission intensity; use of Excel software to analyze the shape of the urban space and the carbon intensity coupling relationship. Correlation, the shape of the low-carbon emission targets under the urban space development proposals.

**【Keywords】** Urban Space Shape; The Intensity of Carbon Emissions; Correlation; Development Proposals; 35 Cities in China