

# 中国低碳城市评价与空间格局分析

吴健生<sup>1,2</sup>, 许娜<sup>1\*</sup>, 张曦文<sup>1</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055;  
2. 北京大学城市与环境学院, 地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:**城市是人类生产和消费活动最为集中的区域,带来了大量的能源消耗和碳排放,低碳城市受到国内外学者广泛探讨。本文从低碳开发、低碳经济、低碳环境、城市规模与能源消耗5个方面22个指标构建了低碳城市评价体系,引入遥感影像中的DMSP-OLS夜间灯光数据集与PM2.5浓度反演影像;利用因子分析、聚类分析及空间相关性分析,将2006年及2010年284个地级及以上城市按照低碳水平分为低碳、相对低碳、相对高碳、高碳四类城市;根据驱动力分为环境主导型、居民主导型、城镇化主导型及产业主导型四种城市类型;空间上识别出京津冀、长三角、山东省及珠三角地区具有低碳城市发展集聚效应;低碳城市发展水平受城市行政等级、产业转型等因素影响。

**关键词:**低碳城市;因子分析;聚类分析;GIS空间分析;DMSP-OLS夜间灯光;PM2.5浓度

## 1 引言

### 1.1 国内外研究进展

目前,低碳城市有狭义和广义两种定义。狭义的低碳城市是指碳排放处于较低的状态,以达到碳的零排放为最终目标。广义的低碳城市则是在保证城市内经济社会正常运转的情况下,通过提升生产技术、改变生活方式、转变消费观念等手段,减少碳排放量(路超君等, 2014),城市发展或城市经济增长与碳排放趋于脱钩(诸大建等, 2010)。本文的研究内容属于广义低碳城市范畴。

2003年英国率先在《我们能源的未来》白皮书中提出低碳经济(DTI U K, 2003);2007年日本提出了低碳社会(Gomi et al, 2007)。国外低碳城市研究内容包括城市碳排放驱动因素(Al-mulali et al, 2013; Aunan et al, 2014)、城市碳循环与碳代谢(Castelnuovo et al, 2003; Pataki et al, 2003; Churkina, 2008)、低碳城市规划(Seyfang, 2010; Feliciano et al, 2011)和城市碳排放管制策略(Lebel et al, 2007; Caetano et al, 2009)等方面。国内学者庄贵

阳等(2004)提出中国城市化进程应寻求基础设施建设的低碳发展路径。低碳城市逐渐成为低碳经济与低碳社会的空间聚焦点(秦耀辰等, 2010)。国内学者研究主要集中在碳排放核算(张金萍等, 2010; 丛建辉等, 2013),城市化对碳排放的影响研究(秦耀辰等, 2014),低碳城市空间规划(潘海啸等, 2008; 顾朝林等, 2009),低碳城市发展的影响因素剖析(Lebel et al, 2007; 路超君等, 2012; 鲁丰先等, 2012),低碳城市评价体系构建(潘家华等, 2009; 仇保兴, 2012)等方面。

目前学者们评估城市低碳水平所广泛使用的方法有两种,分为主要指标法和复合指标法。付允等(2010)提出低碳城市的五大支撑体系,分别为产业结构体系、基础设施体系、消费支撑体系、政策制度体系和技术支撑体系。诸大建等(2011)认为低碳环境竞争力、低碳生产竞争力和低碳社会竞争力是构成城市低碳竞争力评价指标体系的三大类,同时采用上海市2002-2007年间的相关数据,引入灰色理论建立灰熵分析评价模型,针对城市系统的非线性结构,对上海市进行了实证研究。陈静等(2012)

收稿日期:2015-08;修订日期:2015-09。

基金项目:国家自然科学基金项目(41271101) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271101]。

作者简介:吴健生(1965-),男,湖南新化人,教授,主要从事城市景观生态和GIS研究, E-mail: wujsh@pkusz.edu.cn。

通讯作者:许娜(1990-),女,硕士研究生,主要从事土地利用规划与景观生态学研究, E-mail: xuna2013@sz.pku.edu.cn。

引用格式:吴健生,许娜,张曦文. 2016. 中国低碳城市评价与空间格局分析[J]. 地理科学进展, 35(2): 204-213. [Wu J S, Xu N, Zhang X W. 2016. Evaluation of low-carbon city and spatial pattern analysis in China[J]. Progress in Geography, 35(2): 204-213.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.02.007

引入灰色理论建立灰理想关联分析评价模型,利用中国北京、上海、天津和重庆4个城市2007年的相关数据进行实证研究。刘竹等(2011)以“脱钩”模式为目标层,经济发展、碳排放、污染物排放与社会资源消耗为准则层,CO<sub>2</sub>排放等8个具体指标为指标层建立低碳城市评价指标体系,以沈阳市为案例定量描述经济发展过程中单位GDP污染物排放降低的态势,得出现阶段的低碳城市建设水平处于“相对脱钩”的结论。王云等(2014)将已有的低碳生态城市控制性详细规划在传统控规基础上提出增补指标,通过问卷调查、因子分析、聚类分析等研究方法,得到包括4大类共28个指标的增补指标体系,最终构建以41个指标为主的低碳生态城市控制性详细规划的指标体系。

### 1.2 本文的创新性

目前,研究评价低碳城市的指标体系忽视了广大中小城市的指标可获取性,往往只适用于少数城市。低碳城市的评价模型及方法忽视了低碳城市发展空间格局与空间相关性分析、不同时空尺度城市低碳发展水平的评价等。在评价指标的选择上,以往的研究中往往基于统计数据、调查问卷及专家打分项,并不适合全国尺度的低碳城市评价。

本文基于指标的可获取性、统一性原则,选择城市统计年鉴数据作为指标,并利用遥感影像,增加了DMSP-OLS夜间灯光总量和PM2.5浓度两个新指标。有研究表明,夜间灯光影像在表征碳排放方面具有优势和可行性,它可表征城市的能源消耗状况。同时,PM2.5浓度在当今备受学术界及大众关注,将PM2.5浓度作为评价城市是否低碳的指标也符合当下人们对低碳城市的要求。在分析方法上,利用因子分析法和聚类分析法,对284个地级市的发展类型进行了分析,并依据低碳发展水平进行了空间相关性分析。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

本文采用的统计数据来自《中国城市统计年鉴2006》、《中国城市统计年鉴2010》,共搜集全国(除台湾省、香港、澳门及南海地区外)284个地级及以上城市的数据,其中拉萨市、汕尾市及宣城市由于统计数据不全,未被纳入研究样本。

PM2.5浓度遥感反演影像来自于美国航空航

天局的地球观测系统数据和信息系统(EOSDIS),选用的数据集为Global Annual PM2.5 Grids from MODIS, MISR and Sea WiFS Aerosol Optical Depth (AOD), vl(1998-2012),分别选取年份为2005-2007和2009-2011的影像作为2006年及2010年的PM2.5数据进行分析。计算每个行政单元中的PM2.5浓度平均值,为每个城市赋值。DMSP-OLS夜间灯光数据集来自于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家地球物理数据中心(NGDC)官方网站(<http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp>)。采用了2006年和2010年NOAA发布的不存在饱和问题的DMSP-OLS影像。行政区划地图来自于国家基础地理信息系统中国1:400万地形数据库。

### 2.2 研究方法

因子分析在指标评价体系构建中被广泛应用(府亚军等,2005;耿金花等,2007)。

因子分析的数据模型如下:

$$\begin{cases} x_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ x_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ x_n = a_{n1}F_1 + a_{n2}F_2 + \dots + a_{nm}F_m + \varepsilon_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$ 为 $m$ 个因子; $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 为 $n$ 个原有变量, $m$ 小于 $n$ ;  $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nm}$ 为因子载荷; $\varepsilon$ 为特殊因子,即原有变量不能被因子所解释的部分,相当于多元回归分析中的残差部分,表示成矩阵的形式为:

$$X = AF + \varepsilon \quad (2)$$

式中: $A$ 为因子载荷矩阵, $F$ 为因子变量,因子变量具有命名解释性。变量 $X_i$ 的共同度又称为公共方差,反映的是全部公因子对原有变量的总方差所能解释的比例。变量 $X_i$ 的共同度( $h_i^2$ )为因子在载荷矩阵 $A$ 中第 $i$ 行元素的平方和,即:

$$h_i^2 = \sum_{j=1}^m a_{ij}^2 \quad (3)$$

该值越接近于1,说明公因子解释某变量的信息越多。

公因子的方差( $S_j$ )定义为因子载荷矩阵 $A$ 中第 $j$ 列个元素的平方和,即

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}^2 \quad (4)$$

它所反映的是该因子对所有原始变量总方差

的解释能力,其值越大,说明该因子的重要性越高。

### 2.3 低碳城市评价指标体系的构建

从低碳城市发展的角度来说,开发建设、经济发展、环境保护都至关重要。所以准则层为低碳开发、低碳经济、低碳环境、城市规模与能源消耗5个方面。指标层包括人均建成区面积、地区生产总值、年平均PM2.5浓度、人口密度、夜间灯光总量等22个指标(表1)。

### 2.4 低碳城市评价指数的计算

将22个变量数据导入IBM SPSS Statistics中降维处理。KMO=0.759,接近于1,BTS值(球形检验)的显著性小于0.01,通过检验,样本数据为非单位矩阵,适合因子分析法。

利用主成分分析法,设置抽取特征值大于1.5的成分,共提取了5个因子,解释总变异的70.331%(表2)。主因子 $F_1$ 对 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_6$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{19}$ 、 $X_{20}$ 、 $X_{21}$ 有较大载荷,命名为城市建设碳排放与经济发展因子。 $F_2$ 对 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_7$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{22}$ 有较大载荷,命名为人均碳排放与经济发展因子。 $F_3$ 对于 $X_9$ 、 $X_{10}$ 有较大载荷,命名为城市产业格局因子。 $F_4$ 对 $X_5$ 、 $X_8$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$ 有较大载荷,命名为工业污染与集约利用因子。 $F_5$ 对 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 、 $X_{18}$ 有较大载荷,命名为生存竞争与生存环

境因子(表3)。通过Score过程,本文分别计算了主因子的得分和综合得分。低碳城市评价指数 $I$ 的计算公式为:

$$I=0.47 F_1+0.19F_2+0.13F_3+0.11F_4+0.10F_5 \quad (5)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 低碳城市评价指数Z的空间分布

在ArcGIS中,对 $I$ 值使用Natural Breaks(Jenks)自然间断点分级法,将各样本分为低碳城市、相对低碳城市、相对高碳城市和高碳城市四类。2006年和2010年的分级趋势基本相同,低碳和相对低碳城市少,两类城市在所有城市中占1/7左右;相对高碳城市与高碳城市多,占6/7左右。两年的不同之处在于2010年低碳、相对低碳城市和相对高碳城市的数量较2006年各有小幅上升;高碳城市数量下降,降幅达13%(图1)。

结果表明,2006-2010年间,城市低碳发展水平整体上升。值得指出的是,2010年的低碳城市除与2006年相同的北京、上海、深圳、天津、重庆外,增加3个,分别为苏州、广州和鄂尔多斯市(图2-3)。2006-2010年,苏州、广州经济增长较快,同时两市重视城市规划,集约开发、低碳环保等方面较其他城市出色。到2010年升级为低碳城市有一定的必然性。鄂尔多斯市近10年来,成长为备受全国乃至世界关注的城市。该市是一个以羊毛、煤炭、稀土、天然气资源著称的资源型城市,由于抓住了国家能源工业向中西部战略转移的机遇,经济腾飞。2010年,该市房地产业、金融业等行业发展迅猛,人口密集,民生繁荣,所以在2010年被评估为低碳城市。

从低碳城市评价指数 $I$ 的变化来看,将两年差值在 $\pm 5\%$ 之内的城市定义为指数持平城市,大于5%为上升城市,小于-5%为下降城市。2010年较2006年各城市指数 $I$ 普遍升高;中部山西和河南两省的多个城市 $I$ 值下降较为显著,西部陕西省多数城市指数持平;东南沿海地区全部呈现上升趋势(图4)。中国中部城市的低碳发展水平有倒退趋势,沿海城市基本处于低碳发展水平上升阶段。

### 3.2 低碳城市因子聚类分析

在MATLAB软件中,对低碳城市的5个因子进行聚类,根据低碳城市因子聚类结果,画出雷达图(图5-6)。2006年与2010年,四类城市因子聚类趋势相似。将所研究城市类型分为环境主导型、居民

表1 低碳城市评价指标体系结构

Tab.1 Indicator system of low-carbon city evaluation

目标层	准则层	指标层
低碳城市发展水平	低碳开发	$X_1$ 建成区面积/km <sup>2</sup>
		$X_2$ 城市建设用地面积/km <sup>2</sup>
		$X_3$ 人均建成区面积/(km <sup>2</sup> /人)
		$X_4$ 人均建设用地面积/(km <sup>2</sup> /人)
		$X_5$ 地均GDP/(万元/km <sup>2</sup> )
低碳经济		$X_6$ 地区生产总值/万元
		$X_7$ 人均地区生产总值/(元/人)
		$X_8$ 单位GDP工业用电量/(kw·h/元)
		$X_9$ 第二产业占GDP的比重/%
		$X_{10}$ 第三产业占GDP的比重/%
低碳环境		$X_{11}$ 建成区绿化覆盖面积/hm <sup>2</sup>
		$X_{12}$ 人均绿地面积/(m <sup>2</sup> /人)
		$X_{13}$ 建成区绿化覆盖率/%
		$X_{14}$ 工业烟尘排放量/t
		$X_{15}$ 工业二氧化硫排放量/t
城市规模		$X_{16}$ 年平均PM2.5浓度/( $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ )
		$X_{17}$ 人口密度/(人/km <sup>2</sup> )
		$X_{18}$ 土地面积/km <sup>2</sup>
		$X_{19}$ 市辖区总人口/万人
		$X_{20}$ 市辖区用电量总和/(万kw·h)
能源消耗		$X_{21}$ 夜间灯光总量/DN值
		$X_{22}$ 人均居民生活用电/(万kw·h/人)

表2 解释的总方差  
Tab. 2 Total variance explained

成份	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差百分比/%	累积百分比/%	合计	方差百分比/%	累积百分比/%	合计	方差百分比/%	累积百分比/%
1	7.209	32.767	32.767	7.209	32.767	32.767	6.556	29.801	29.801
2	2.894	13.154	45.922	2.894	13.154	45.922	3.153	14.333	44.134
3	1.997	9.076	54.997	1.997	9.076	54.997	2.076	9.436	53.569
4	1.778	8.083	63.081	1.778	8.083	63.081	1.915	8.705	62.275
5	1.595	7.250	70.331	1.595	7.250	70.331	1.772	8.056	70.331
6	1.175	5.342	75.672						
7	0.867	3.939	79.612						
8	0.806	3.664	83.276						
9	0.693	3.151	86.427						
10	0.530	2.409	88.836						
11	0.501	2.276	91.112						
12	0.426	1.935	93.048						
13	0.357	1.622	94.670						
14	0.304	1.382	96.052						
15	0.252	1.144	97.195						
16	0.194	0.882	98.077						
17	0.117	0.534	98.611						
18	0.101	0.461	99.072						
19	0.090	0.410	99.483						
20	0.066	0.300	99.782						
21	0.035	0.160	99.943						
22	0.013	0.057	100.000						

注:提取方法为主成分分析。

表3 旋转成分矩阵<sup>a</sup>  
Tab. 3 Ingredients rotation matrix

指标变量	成分				
	1	2	3	4	5
X <sub>19</sub> 市辖区总人口/万人	0.932	-0.157			
X <sub>1</sub> 建成区面积/km <sup>2</sup>	0.925	0.202	-0.138		
X <sub>6</sub> 地区生产总值/万元	0.911	0.146		-0.154	
X <sub>11</sub> 建成区绿化覆盖面积/hm <sup>2</sup>	0.893	0.227	-0.138	-0.115	
X <sub>20</sub> 市辖区用电量总和/(万 kw· h)	0.878	0.149			0.164
X <sub>2</sub> 城市建设用地面积/km <sup>2</sup>	0.843	0.203	-0.103		
X <sub>21</sub> 年夜间灯光总量/DN值	0.609	0.150			0.107
X <sub>3</sub> 人均建成区面积/(km <sup>2</sup> /人)		0.923		0.141	
X <sub>4</sub> 人均建设用地面积/(km <sup>2</sup> /人)		0.891		0.104	
X <sub>12</sub> 人均绿地面积/(m <sup>2</sup> /人)	0.160	0.680		-0.163	
X <sub>7</sub> 人均地区生产总值/(元/人)	0.396	0.597	0.375	-0.197	0.129
X <sub>22</sub> 人均居民生活用电/(万 kw· h)	0.423	0.568		-0.392	0.281
X <sub>9</sub> 第二产业占GDP的比重/%		0.203	0.906		0.132
X <sub>10</sub> 第三产业占GDP的比重/%	0.217	0.107	-0.893		0.106
X <sub>14</sub> 工业烟尘排放量/t	0.288		0.115	0.693	0.204
X <sub>15</sub> 工业二氧化硫排放量/t	0.546		0.223	0.572	0.122
X <sub>5</sub> 地均GDP/(万元/km <sup>2</sup> )	0.484		0.348	-0.536	0.280
X <sub>13</sub> 建成区绿化覆盖率/%	0.186	0.151		-0.488	0.381
X <sub>8</sub> 单位GDP工业用电量/(kw· h/元)	-0.132			0.457	0.139
X <sub>17</sub> 人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	0.157		-0.116	0.181	0.749
X <sub>18</sub> 土地面积/km <sup>2</sup>	0.482	-0.127		0.132	-0.659
X <sub>16</sub> 年平均PM2.5浓度/(μg/(m <sup>3</sup> · a))		-0.181	0.150	0.118	0.539

注:提取方法为主成分分析。旋转法:具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。a. 旋转在7次迭代后收敛。

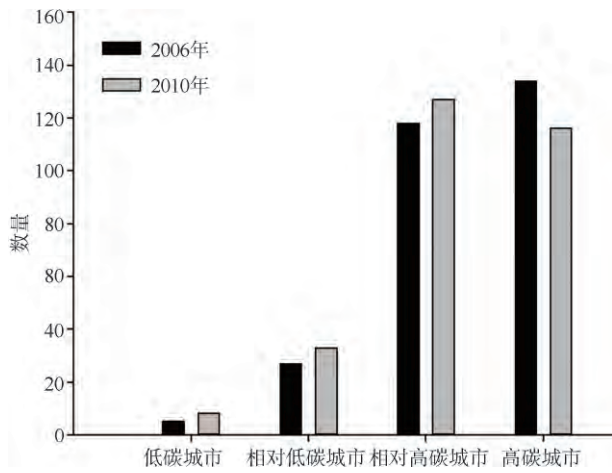


图1 2006-2010年不同等级低碳城市数量

Fig.1 The number of cities of different low-carbon status in 2006 and 2010

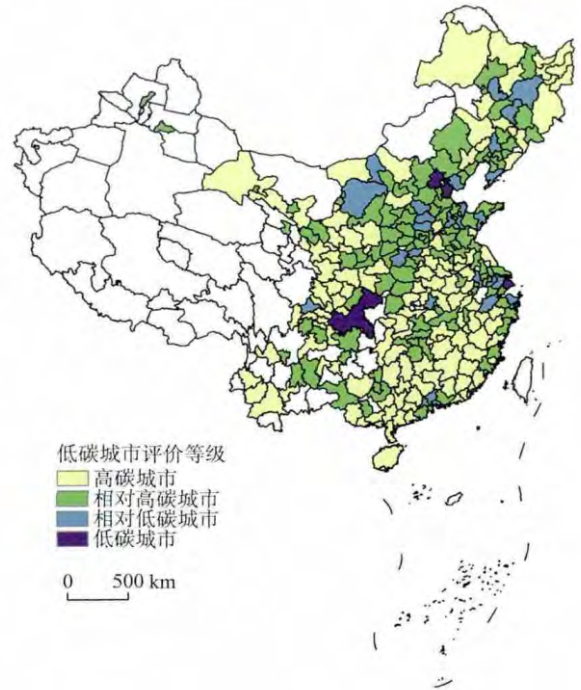


图2 2006年不同等级的低碳城市空间分布

Fig.2 Spatial distribution of cities of different low-carbon status in 2006

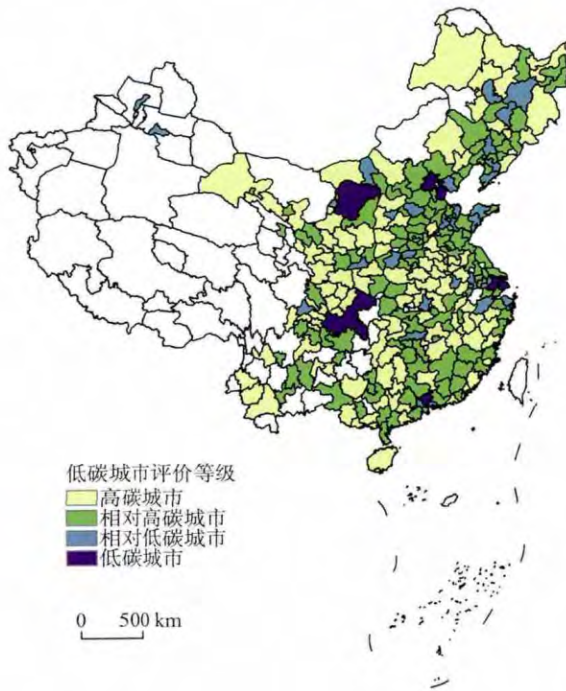


图3 2010年不同等级的低碳城市空间分布

Fig.3 Spatial distribution of cities of different low-carbon status in 2010

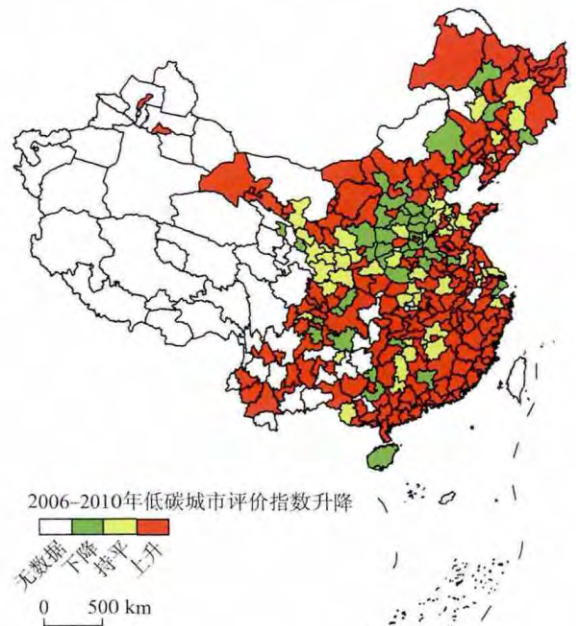


图4 2006-2010年低碳城市评价指数升降分布

Fig.4 Trend of low-carbon city evaluation index values, 2006-2010

主导型、城镇化主导型及产业主导型。

2006年低碳城市因子聚类结果显示,环境主导型和产业主导型为中国城市的主要类型,各占32%;城镇化主导型次之,占21%;居民主导型最少,占15%。2010年产业主导型城市占37%;其次是居民主导型占26%;环境主导型和城镇化主导型数量接近,各占19%和18%。2010年与2006年相比,环境主导型城市数量降幅最大,达13%;居民主导型

城市增幅最大,达到9%(图7)。

从城市类型的空间分布来看,东南沿海地区的环境主导型城市多转化为居民主导型,说明东南沿

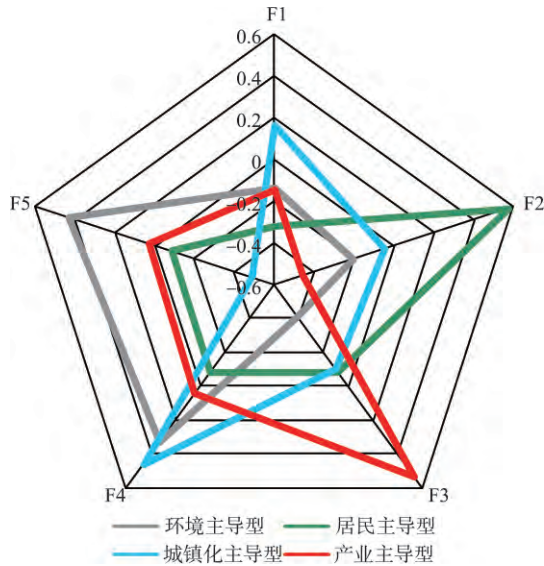


图5 2006年低碳城市因子聚类分析结果

Fig.5 Factor cluster analysis of low-carbon city in 2006

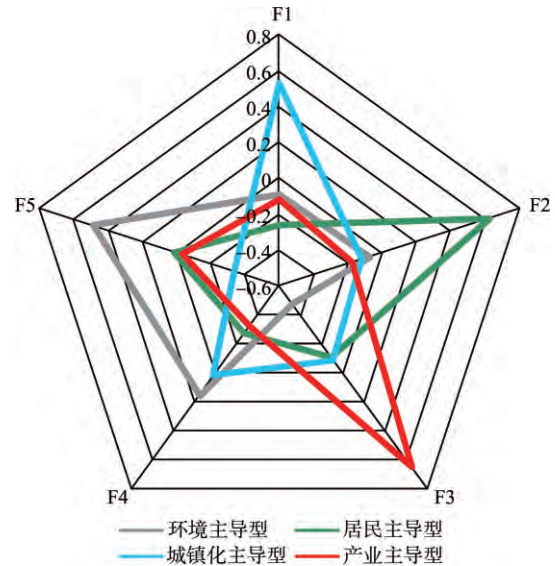


图6 2010年低碳城市因子聚类分析结果

Fig.6 Factor cluster analysis of low-carbon city in 2010

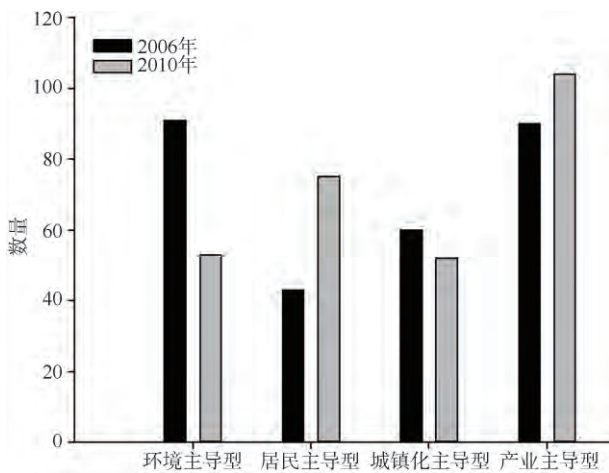


图7 2006年与2010年不同类型低碳城市数量

Fig.7 The number of different types of low-carbon cities in 2006 and 2010

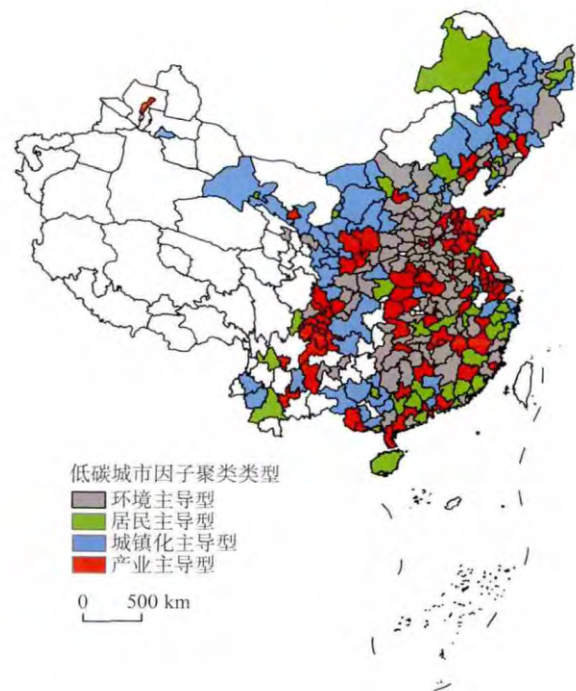


图8 2006年不同类型低碳城市空间分布

Fig.8 Spatial distribution of different types of low-carbon cities in 2006

海地区的经济发展水平较好,居民低碳观念较强、人均碳排放量下降。西北地区在2006年多表现为城镇化主导型,说明2006年该地区的城镇化进程较快;到2010年则出现分化,表现出居民主导型、产业主导型及环境主导型多种类型,表明中国西北地区的城市发展有着不同的路径(图8-9)。

### 3.3 低碳城市空间相关性分析

一个城市的低碳发展,不仅受到自身资源禀赋、城市规模、发展模式等因素的影响,还受到周边地区的影响,从而表现出一定的空间相关性。运用ArcGIS空间分析工具,对低碳城市进行空间相关性

分析。

#### 3.3.1 低碳城市的空间相关性分析

以2006年及2010年两年的低碳城市评价指数作为基础数据,利用空间自相关模型度量各城市经济增长的空间相关性。使用ArcGIS中空间自相关工具,计算Global Moran's *I*。2006年,*P*值小于

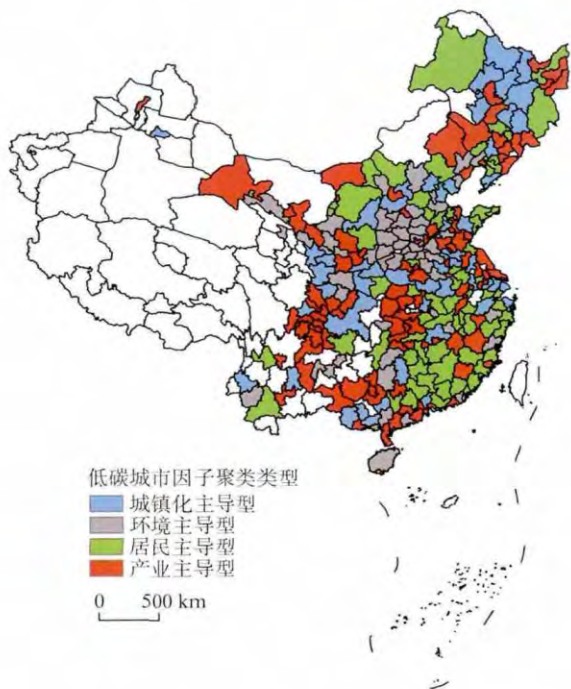


图9 2010年不同类型低碳城市空间分布  
Fig.9 Spatial distribution of different types of low-carbon cities in 2010

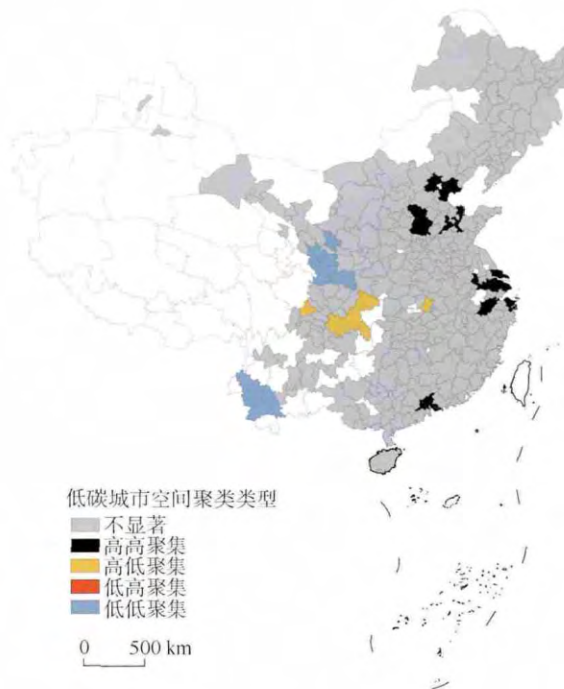


图10 2006年低碳城市空间聚集类型  
Fig.10 Spatial aggregation types of low-carbon city in 2006

0.01, Moran's *I* 值为 0.17; 2010 年, *P* 值小于 0.01, Moran's *I* 值为 0.16, 表明这两年的低碳城市评价指标分布具有较强的空间正相关性, 低碳城市呈现空间集聚分布。

### 3.3.2 低碳城市的空间关联模式

在 ArcGIS 中, 使用聚类和异常值分析工具 (Anselin Local Moran's *I*) 进行分析。根据自相关模型识别出 5 种低碳城市效应的空间关联模式: 高高聚集型 (HH)、高低异常型 (HL, 该区域低碳水平明显高于周边)、低高异常型 (LH, 该区域低碳水平明显低于周边)、低低聚集型 (LL) 和不显著地区。低碳城市的高高聚集型全部分布于珠三角、长三角、京津冀及山东地区。高低异常型集中于成都、重庆和武汉三市。低低聚集型主要分布于云南、甘肃地区, 宁夏、陕西、四川也有少量分布。低高异常型只在 2006 年出现于舟山市 (图 10-11)。

从时空变化上来看, HH 区由 21 个减少为 18 个, 珠三角增加了珠海市; 京津冀地区减少了邯郸、邢台、石家庄三市; 长三角地区减少了常州和南通两市; 山东省的青岛和烟台取代了济南。HL 区保持不变。舟山市由 LH 转变为不显著地区。LL 区由 8 个增加到 10 个, 其中甘肃省增加 2 个, 四川省增加 1 个, 云南省普洱市则退出 LL 区。

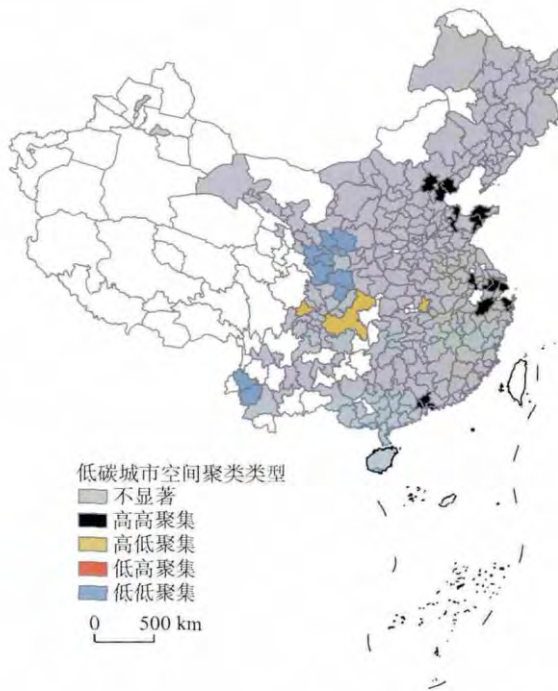


图11 2010年低碳城市空间聚集类型  
Fig.11 Spatial aggregation types of low-carbon city in 2010

## 4 结论与讨论

本文从构建低碳城市评价体系及分析中国城市低碳发展水平两个方面着眼, 获得了 2006 年及

2010年两年的低碳城市评价指数 $I$ 值的空间分布及因子聚类下的四种城市类型空间分布,客观、直观、动态的评价了中国284个城市的低碳发展水平。

#### 4.1 低碳城市评价

(1) 本文基于数据可获取原则、动态性和可比性等原则,从低碳开发、低碳经济、低碳环境、城市规模与能源消耗五个方面构建低碳城市评价指标体系。引入遥感影像,利用夜间灯光值及PM2.5浓度反演数据,增加评价指标的全面性。

(2) 利用因子分析法,可以避免各指标的相关性问题,获得了较为客观的权重。得到了低碳城市评价指数 $I$ 值,并利用自然断点法将城市分类为低碳城市、相对低碳城市、相对高碳城市和高碳城市。

(3) 使用因子聚类分析将城市类型进行区分,得到环境主导型、居民主导型、城镇化主导型及产业主导型四种城市类型,有助于分析城市发展路径和发展阶段。

(4) 用空间相关性分析识别出城市低碳发展水平的聚集类型,低碳发展水平受地理因素影响,具有空间相关性。

(5) 选取2006年及2010年的数据,跨越了2007年金融危机、2008年中国奥运会、2009年哥本哈根气候变化大会这几个历史性事件。不同年份,城市有不同的表现,说明低碳城市的发展是随着时间、政策、科技的变化而变化的,低碳的评价标准也是相对的、动态的。

本文认为,在评价低碳城市发展时,选择客观数据,如统计数据、遥感数据作为指标,进行年际比较和城市间的比较更能反映低碳城市发展水平和存在的问题。

#### 4.2 所反映的问题

(1) 行政级别对城市低碳发展的影响。从研究结果中可以看出,低碳水平发展最好的为直辖市,其次为副省级城市。行政级别对城市的发展影响深远。行政级别更高的城市,所拥有的政策更开放、经济更发达、人才更丰富,城市产业升级、环境提升、低碳发展步伐也更快。

(2) 低碳城市发展的趋势。从低碳城市评价指数 $I$ 的变化来看,2010年较2006年各城市指数 $I$ 普遍升高。由于沿海地区的开发开放早,经济基础较好,产业逐步升级,城市低碳发展的水平持续升高。与之不同的是中西部地区,尤其是依靠资源发展的中西部地区,承接了更多由沿海地区迁出的高

能耗、重污染产业,不利于城市的低碳发展。但是,一些产业虽然耗能高、污染重,却是国家和国民不可或缺的行业,扮演着国民经济、产业链条中的重要角色。针对这些产业,不能以迁出、取缔为目标,而应该加强科技投入。在产业转移的过程中,提高产业准入门槛,强制要求使用更加节能环保的技术和设备,避免产业转移等于高耗能高污染转移的现象。

#### 4.3 低碳城市政策建议

(1) 科学管理城市增长,合理界定城市规模。城镇化是中国城市发展的重要环节,也是必须坚持的经济发展道路,然而当前粗放式发展方式引起较大的能源消耗,进而造成碳排放增加。城镇化建设中要兼顾经济发展与碳排放控制,不仅要避免城市无序扩张,科学界定城市增长规模,而且要注重技术革新,加大推进清洁能源及低能耗材料的使用。

(2) 分析城市发展模式,因地制宜开展碳减排。本文通过对评价因子聚类分析,将低碳城市划分为环境主导型、居民主导型、城镇化主导型及产业主导型。通过对城市发展模式深入了解,分析其碳排放主要来源,把握碳排放的主导因素,才能因地制宜地制定碳减排措施,摒除“高排放、低增长”经济模式。

(3) 完善碳交易平台,发展碳金融市场。完备的碳交易机制,有助于发挥市场调节功能平衡碳排放。国家鼓励符合碳减排特征的新产品开发,吸引资金流入碳减排市场,可以充分发挥碳排放权的经济效益,保障碳交易项目有效开展。

#### 参考文献(References)

- 陈静,程东祥,诸大建. 2012. 基于灰理想关联分析的中国城市低碳竞争力评价[J]. 资源科学, 34(9): 1726-1733. [Chen J, Cheng D X, Zhu D J. 2012. Evaluation of urban low-carbon competitiveness in china using grey relational analysis[J]. Resources Science, 34(9): 1726-1733.]
- 丛建辉,刘学敏,朱婧,等. 2013. 中小城市工业碳排放:核算方法与影响因素:以河南省济源市为例[J]. 资源科学, 35(11): 2158-2165. [Cong J H, Liu X M, Zhu J, et al. 2013. Accounting method and factors affecting industrial CO<sub>2</sub> emissions of small and medium-sized cities: Jiyuan city in Henan[J]. Resources Science, 35(11): 2158-2165.]
- 府亚军,黄海南. 2005. 基于因子分析模型的上市公司经营业绩评价[J]. 统计与决策, (24): 167-168. [Fu Y J, Huang H N. 2005. Jiyu yinzifenxi moxing de shangshigongsi jingying yeji pingjia[J]. Statistics & Decision, (24): 167-



- 168.]
- 付允, 刘怡君, 汪云林. 2010. 低碳城市的评价方法与支撑体系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 20(8): 44-47. [Fu Y, Liu Y J, Wang Y L. 2010. Evaluation method and supporting system of low carbon cities[J]. China Population Resources & Environment, 20(8): 44-47.]
- 耿金花, 高齐圣, 张嗣瀛. 2007. 基于层次分析法和因子分析的社区满意度评价体系[J]. 系统管理学报, 16(6): 673-677. [Geng J H, Gao Q S, Zhang S Y. 2007. Community satisfaction evaluation system's research based on AHP and factor analysis[J]. Journal of Systems & Management, 16(6): 673-677.]
- 顾朝林, 谭纵波, 刘宛, 等. 2009. 气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展[J]. 城市规划学刊, (3): 38-45. [Gu C L, Tan Z B, Liu W, et al. 2009. A study on climate change, carbon emissions and low-carbon city planning[J]. Urban Planning Forum, (3): 38-45.]
- 刘竹, 耿涌, 薛冰, 等. 2011. 基于“脱钩”模式的低碳城市评价[J]. 中国人口·资源与环境, 21(4): 19-24. [Liu Z, Geng Y, Xue B, et al. 2011. Low-carbon city's quantitative assessment indicator framework based on decoupling model[J]. China Population Resources & Environment, 21(4): 19-24.]
- 路超君, 秦耀辰, 罗宏, 等. 2012. 中国低碳城市发展影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 22(6): 57-62. [Lu C J, Qin Y C, Luo H, et al. 2012. Analysis of influencing factors of low-carbon city development in China[J]. China Population Resources & Environment, 22(6): 57-62.]
- 路超君, 秦耀辰, 张金萍. 2014. 低碳城市发展阶段划分与特征分析[J]. 城市发展研究, 21(8): 12-16. [Lu C J, Qin Y C, Zhang J P. 2014. Analysis on stages and characteristics of low-carbon city[J]. Urban Development Studies, 21(8): 12-16.]
- 鲁丰先, 王喜, 秦耀辰, 等. 2012. 低碳发展研究的理论基础[J]. 中国人口·资源与环境, 22(9): 8-14. [Lu F X, Wang X, Qin Y C, et al. 2012. Theoretical basis of low-carbon development research[J]. China Population Resources & Environment, 22(9): 8-14.]
- 潘海啸, 汤葐, 吴锦瑜, 等. 2008. 中国“低碳城市”的空间规划策略[J]. 城市规划学刊, (6): 57-64. [Pan H X, Tang Y, Wu J Y, et al. 2008. Spatial planning strategy for “low carbon cities” in China[J]. Urban Planning Forum, (6): 57-64.]
- 潘家华, 牛凤瑞, 魏后凯. 2009. 城市蓝皮书: 中国城市发展报告 No.2[M]. 北京: 社会科学文献出版社. [Pan J H, Niu F R, Wei H K. 2009. Blue book of cities in China: annual report on urban development of China No.2[M]. Beijing, China: Social Science Academic Press (China).]
- 秦耀辰, 荣培君, 杨群涛, 等. 2014. 城市化对碳排放影响研究进展[J]. 地理科学进展, 33(11): 1526-1534. [Qin Y C, Rong P J, Yang Q T, et al. 2014. Research progress of impact of urbanization on carbon emissions[J]. Progress in Geography, 33(11): 1526-1534.]
- 秦耀辰, 张丽君, 鲁丰先, 等. 2010. 国外低碳城市研究进展[J]. 地理科学进展, 29(12): 1459-1469. [Qin Y C, Zhang L J, Lu F X, et al. 2010. Progresses of low-carbon city research[J]. Progress in Geography, 29(12): 1459-1469.]
- 仇保兴. 2012. 兼顾理想与现实: 中国低碳生态城市指标体系构建与实践示范初探[M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 124-126. [Qiu B X. 2012. Jiangu lixiang yu xianshi: zongguo ditan shengtai chengshi zhibiaotixi goujian yu shijian shifan chutan[M]. Beijing, China: China Architecture & Building Press: 124-126.]
- 王云, 陈美玲, 陈志端. 2014. 低碳生态城市控制性详细规划的指标体系构建与分析[J]. 城市发展研究, 21(1): 46-53. [Wang Y, Chen M L, Chen Z D. 2014. The analysis and construction on Index system for regulatory detailed planning of low-carbon eco-city[J]. Urban Development Studies, 21(1): 46-53.]
- 张金萍, 秦耀辰, 张艳, 等. 2010. 城市 CO<sub>2</sub> 排放结构与低碳水平测度: 以京津沪渝为例[J]. 地理科学, 30(6): 874-879. [Zhang J P, Qin Y C, Zhang Y, et al. 2010. Measurement of urban CO<sub>2</sub> emission structure and low-carbon standard: a case study for Beijing, Tianjin, Shanghai and Chongqing city[J]. Scientia Geographica Sinica, 30(6): 874-879.]
- 诸大建, 陈飞. 2010. 上海发展低碳城市的内涵、目标及对策[J]. 城市观察, (2): 54-68. [Chu D J, Chen F. 2010. The connotation, objectives and strategies of Shanghai's low-carbon growth[J]. Urban Insight, (2): 54-68.]
- 诸大建, 陈静. 2011. 城市低碳竞争力评价模型和上海市的实证研究[J]. 现代城市研究, (11): 10-14. [Zhu D J, Chen J. 2011. Evaluation model of urban low-carbon competitiveness and empirical research of Shanghai[J]. Modern Urban Research, (11): 10-14.]
- 庄贵阳, 张伟. 2004. 中国城市化: 走好基础设施建设低碳排放之路[J]. 环境经济, (5): 39-43. [Zhuang G Y, Zhang W. 2004. Zhongguo chengshihua: zouhao jichu sheshi jianshe ditan paifang zhi lu[J]. Environment Economic, (5): 39-43.]
- Al-mulali U, Fereidouni H G, Lee J Y M, et al. 2013. Exploring the relationship between urbanization, energy consumption, and CO<sub>2</sub> emission in MENA countries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23: 107-112.
- Aunan K, Wang S X. 2014. Internal migration and urbanization in China: impacts on population exposure to household air pollution (2000-2010)[J]. Science of the Total En-

- vironment, 481: 186-195.
- Caetano M A L, Gherardi D F M, de Paula Ribeiro G, et al. 2009. Reduction of CO<sub>2</sub> emission by optimally tracking a pre-defined target[J]. *Ecological Modelling*, 220(19): 2536-2542.
- Castelnuovo E, Galeotti M, Gambarelli G, et al. 2003. Learning-by-doing vs. learning by researching in a model of climate change policy analysis[J]. *Ecological Economics*, 54(2-3): 261-276.
- Churkina G. 2008. Modeling the carbon cycle of urban systems [J]. *Ecological Modeling*, 216(2): 107-113.
- DTI U K. 2003. Energy white paper: our energy future: creating a low carbon economy[M]. London: DTI.
- Feliciano M, Prosperi D C. 2011. Planning for low carbon cities: reflection on the case of Broward county, Florida, USA[J]. *Cities*, 28(6): 505-516.
- Gomi K, Shimada K, Matsuoka Y, et al. 2007. Scenario study for a regional low-carbon society[J]. *Sustainability Science*, 2(1): 121-131.
- Lebel L, Garden P, Banaticla M R N, et al. 2007. Management into the development strategies of urbanizing regions in Asia: implications of urban function, form, and role[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2): 61-81.
- Pataki D E, Bowling D R, Ehleringer J R. 2003. Seasonal cycle of carbon dioxide and its isotopic composition in an urban atmosphere: anthropogenic and biogenic effects[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(23): 4735.
- Seyfang G. 2010. Community action for sustainable housing: building a low-carbon future[J]. *Energy Policy*, 38(12): 7624-7633.

## Evaluation of low-carbon city and spatial pattern analysis in China

WU Jiansheng<sup>1,2</sup>, XU Na<sup>1\*</sup>, ZHANG Xiwen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Cities are the most concentrated area of production and consumption activities of the human race, which brings about great amounts of energy consumption and carbon emissions. Therefore, low-carbon city is widely discussed by scholars around the world. In this study, 22 indicators in five areas, including low-carbon development, low-carbon economy, low-carbon environment, city size, and energy consumption, were used to establish an evaluation system for low-carbon city. Remote sensing images of the DMSP-OLS Nighttime Light sets and PM<sub>2.5</sub> concentration inversion image were innovatively included in these indicators. Using factor analysis, cluster analysis, and spatial correlation analysis, 284 cities in China were classified as low-carbon cities, comparatively low-carbon cities, comparatively high-carbon cities, and high-carbon cities in 2006 and 2010. The result shows that the low-carbon status of these cities generally improved in 2010 as compared to 2006. According to the driving forces of city development, these cities were divided into four types: environment-oriented, people-oriented, urbanization-dominated, and industry-dominated. Spatially, the Beijing-Tianjin-Hebei area, the Yangtze River Delta region, Shandong Province, and the Pearl River Delta region had the aggregated effect of low-carbon city development. Chongqing, Chengdu, and Wuhan were distinguished from the periphery cities that had lower level of low-carbon development and belonged to the hotspot cities of advanced low-carbon development in Southwest China. Low-carbon development of cities is affected by the administrative level and industrial transformation of cities, among other factors.

**Key words:** low-carbon city; factor analysis; cluster analysis; GIS spatial analysis; DMSP-OLS nighttime light; PM<sub>2.5</sub> concentration