

基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995–2009年中国地级市能源消费动态

吴健生^{1,2},牛妍¹,彭建^{1,2},王政³,黄秀兰¹

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院 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资源与环境地理系 地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;
3. 嘉兴市南湖区住房与城乡规划建设局, 浙江 嘉兴 314051)

摘要: 能源是国民经济发展的重要支撑, 便捷准确地获取能源消费时空动态信息, 对于合理制定能源政策具有重要意义。基于DMSP/OLS夜间灯光数据和能源统计数据之间的定量关联, 在地级市尺度上模拟了中国1995–2009年能源消费的空间格局, 并采用空间自相关分析探讨其时空动态特征。研究表明: 基于DMSP/OLS夜间灯光数据模拟中国各地市能源消费具有一定的可行性, 该数据能够比较可靠地反映能源消费的时空动态; 1995–2009年中国大多数地市的能源消费量较低, 中低强度能源消费区土地面积占全国72.66%, 高能源消费强度区集中分布在中国东部地区; 中国能源消费量存在显著的空间集聚性(历年Moran's I指数都大于0.4), 全国地级市能源消费高高聚集和低低聚集现象明显。

关键词: DMSP/OLS; 能源消费量模拟; 空间自相关分析; 地级市

DOI: 10.11821/dlyj201404003

1 引言

能源是工业的血液与社会体系的运行动力, 在国民经济与社会事业发展过程中具有不可取代的重要作用; 随着中国工业化进程的不断加快和城镇化水平的不断提高, 全社会能源消费量逐年增加, 能源安全逐步成为国家安全战略的重要考量因素; 而便捷准确地获取能源消费的时空动态信息, 则是能源决策的重要依据^[1,2]。目前, 国内关于能源消费的研究主要集中在能源消费与碳排放和经济增长的关系^[3,4]、能源利用强度和利用效率^[5,6]、能源消费水平差异及影响因素^[7,8]和能源消费预测与能源安全^[9]等几大方面, 研究多以整个中国大陆、省域和省会城市为研究样本。获取不同年份各个地区的能源消费总量是能源消费研究的基础, 但是目前中国还缺乏市级和县级区域的能源消费统计数据。

近年来, 美国军事气象卫星Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 搭载的Operational Linescan System (OLS) 传感器获取的夜间灯光数据受到了学者的广泛关注。OLS传感器可以探测到微弱的夜间灯光。该夜间灯光数据产品具有获取容易、能够探测低强度灯光、不受光线阴影影响等优点^[10]。目前, 夜间灯光数据被广泛应用在城市空间过程重建^[11–13]、城市空间扩展^[14,15]、人口密度模拟^[16–18]、城市热岛^[19,20]和电力能源消耗^[21–23]等诸多领域。1997年Elvidge等^[21]发现灯光面积与电力能源消费量间存在线性关系, 2005年

收稿日期: 2013-08-22; 修订日期: 2014-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271101)

作者简介: 吴健生(1965-), 男, 湖南新化人, 教授, 研究方向为城市景观生态和GIS。E-mail: wuj@szpku.edu.cn
625-634页

Amaral 等^[22]也认为灯光亮度与电力能源消费量呈线性相关，2011 年李通等^[24]利用夜间灯光数据模拟了中国大陆县域的电力能源消费，但是 DMSP/OLS 探测到的灯光不仅来源于电力消耗所产生的灯光，同时还包括一些其他能源消耗所产生的灯光，例如汽车通过消耗石油而产生的汽车灯光。因此，本文将探讨能源消费总量与夜间灯光数据的关联关系。目前直接利用夜间灯光数据研究能源消费总量的研究尚较鲜见。

本文利用 1995-2009 年中国的 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据和能源统计数据之间的关系，模拟中国分地市的能源消费总量的时空动态。在能源统计数据的支持下，首先建立基于 DMSP/OLS 稳定夜间灯光时间序列的能源消费模拟模型；然后，利用该模型在地级市尺度上模拟了中国 1995-2009 年各地市的能源消费的空间格局，并应用空间自相关方法，揭示中国能源消费总量的时空动态过程，以期为能源管理部门提供决策支持和数据参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文以中国除去香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省和西藏自治区的其他 30 个省级行政区为研究区（港、澳、台、藏的统计数据暂时缺失），使用的数据主要包括 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据、能源统计数据和其他相关辅助数据。

(1) DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据。该数据来源于美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的国家地理数据中心 (National Geophysical Data Center, NGDC)。数据的空间分辨率为 30 弧秒 (Arc Second)，在赤道处约 1 km。稳定灯光数据包括了来自城市、乡镇及其他有持久光源的场所发出的灯光，并且去除了背景噪声，所以在文中采用此种稳定灯光数据。由于该数据不同年间通过不同卫星获得，且数据存在像元饱和问题，因此在使用之前首先利用 Wu 等^[25]提出的不变目标法对数据进行了相对辐射校正和饱和纠正。

(2) 能源统计数据。统计数据主要包括两部分，一是由国家统计局能源统计司编著的《中国能源统计年鉴》中中国大陆省级 1995-2009 年能源消费量数据。为方便计算，能源消费总量的单位统一换算为 10^2 tce(百吨标准煤)（因为重庆市 1997 年正式成为直辖市，《中国能源统计年鉴》中无重庆市 1995 年、1996 年数据，重庆市相关数据通过《1999 年重庆统计年鉴》获取。）

(3) 相关辅助数据。主要包括国家基础地理信息系统网站获取的中国 1:400 万的省和地级市行政边界数据。

2.2 研究内容和方法

2.2.1 能源消费量模拟 1997 年 Elvidge 等^[21]通过研究美国、巴西等 21 个国家的灯光数据和电力能源消费量，得出灯光面积和电力能源消费之间存在线性相关关系；Amaral 等^[22]通过分析巴西亚马逊流域一些地区的灯光总量和电力能源消费，也得出这些因素之间的相关关系；Kiran 等^[23]利用相关分析方法计算了印度 29 个州 1993-2002 年灯光数据与电力能源消费之间的相关系数。本文假设能源消费总量和灯光总量之间也存在相关关系，对数据做三种相关关系的检验，探讨能源消费总量和灯光总量之间的关联关系。这三种相关关系分别是指数相关、线性相关和对数相关关系。因变量 y 为中国 30 个省级行政区的能源消费总量，自变量 x 为 30 个省级行政区所有栅格的灰度值之和，即 30 个省的灯光总量。在 Excel 中，分别对上述两组变量做了指数相关、线性相关和对数相关关系的探索，得到中

国能源消费总量和灯光总量之间三种关系的拟合优度图(图1)。

由图1可见,能源消费总量和灯光总量之间,线性相关关系和对数相关关系都较强,但是线性相关性拟合优度更高,相关性更强。由此,本文利用中国30个省的能源消费量和夜间灯光总量之间的线性相关关系,通过回归分析建立了中国分省能源消费量的线性模拟模型,考虑到降尺度模型反演的精度问题,本文采取不含截距的线性模型:

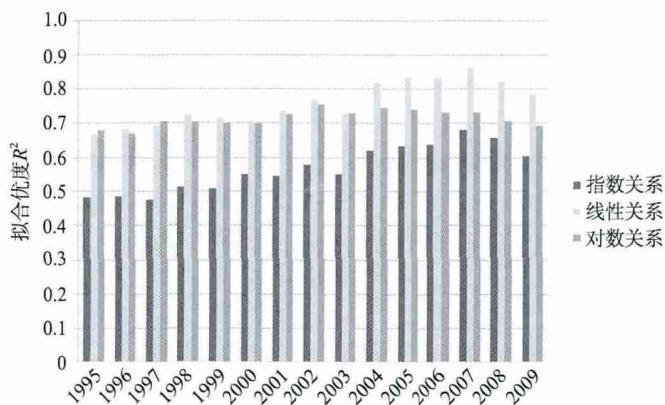


图1 中国能源消费量和灯光总量之间三种关系拟合优度图

Fig. 1 Goodness of fit of energy consumption and total light in China

$$E_{it} = k_t D N_{it} \quad (1)$$

式中: E_{it} 为 t 年 i 省的能源消费量的统计值; k_t 为 t 年的系数; $D N_{it}$ 为 t 年 i 省的所有栅格的灰度值之和。

利用 ArcGIS 10.0 计算中国大陆各地级市的 DN 总和,根据式(1)建立的最终模型结果,反演计算出每个市的模拟能源消费量,并将反演结果空间化,最终建立中国分地市的能源消费总量格局。再在 ArcGIS 软件中,计算出中国 1995-2009 年各地级市的平均能源消费量,根据标准差分级法(表1),将中国大陆各地级市的能源消费状况分为四个等级:低能源消费区、中等能源消费区、较高能源消费区和高能源消费区,得到中国分地市 1995-2009 年的平均能源消费量空间格局。

2.2.2 空间自相关分析 空间自相关指空间单元的属性在空间位置上的相互依赖关系^[27]。空间自相关分为全局空间自相关和局部空间自相关。

(1) 全局空间自相关,是研究相近或相邻空间单元属性的空间相关性,探索的是总体空间相关模式,反映的是属性值在整个研究区域内空间相关性的总体趋势

^[26]。比较常用 Moran's I 指数进行度量。其计算公式如下:

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{i,j} z_i z_j}{S \sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{i,j} \quad (3)$$

$$z_i = x_i - \bar{x} \quad (4)$$

式中: x_i 和 x_j 是变量在相邻配对空间单元的取值(本文为每个地级市的能源消费量); \bar{x} 是各地级市能源消费量的平均值; N 是地级市的总个数($N=333$); $w_{i,j}$ 是两个相邻样本点 i 和 j

的空间权重。指数 I 的取值是 -1 到 1 之间。当 I 的值大于 0 时，为正相关， I 值越接近 1，表明具有相似属性的空间单元产生集聚；当 I 的值小于 0 时，为负相关， I 值越接近 -1 表明具有相异属性的空间单元产生积聚；当 I 的值接近或等于 0 时，表明空间单元的属性值不具有相关性，呈随机分布状态。

对于全局的空间自相关的分析结果，采用 Z 值的显著性检验。若 I 指数的正态统计分布，在 0.05 的显著性水平下， Z 值大于 1.96 时，表明具有显著的正相关性；在 Z 值小于 -1.96 时，表明具有显著的负相关性；当 Z 值为 0 时，表明不具有相关性^[27]。

(2) 局部空间自相关，由于整体空间中可能存在部分正的空间自相关与部分负的空间自相关共存，因此常采用局部空间自相关分析揭示可能的空间变异性。局部

表 2 中国分省 1995–2009 年能源消费量模拟模型参数

Tab. 2 Parameters of energy consumption simulation model among provinces in China, 1995–2009

年份	K	R^2
1995	1.254	0.482
1996	1.270	0.491
1997	1.148	0.447
1998	1.106	0.543
1999	1.057	0.532
2000	1.065	0.570
2001	1.091	0.599
2002	1.202	0.660
2003	1.096	0.600
2004	1.229	0.767
2005	1.370	0.798
2006	1.425	0.801
2007	1.468	0.846
2008	1.419	0.801
2009	1.434	0.738

空间自相关揭示的是空间内局部单元与相邻单元就同一现象的属性值的相关性^[26]。通常采用局部空间自相关指标 LISA (Local Indicators of Spatial Association) 检验。其公式如下：

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{i,j}(x_j - \bar{x}) \quad (5)$$

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N (x_j - \bar{x})^2}{N-1} - \bar{x}^2 \quad (6)$$

式中： I_i 是空间单元 i 和 j 能源消费量的空间异质性指标； $x_i(x_j)$ 是 $i(j)$ 市的能源消费量； \bar{x} 是各地级市能源消费平均值； $w_{i,j}$ 是空间单元 i 和 j 之间的影响程度。

3 结果分析

3.1 能源消费总量模拟结果及验证

中国 30 个省级行政区各年份的能源消费模拟的结果见表 2。其中，假定无灯光数据区的能源消费量为 0。从模拟数据来看，每一年的能量消费量与各个地区 DN 总值呈线性相关，且相关性都较强，仅有三个年份的 R^2 小于 0.5，2007 年的相关性最大， R^2 达到了 0.846。所有年份均通过了 0.01 水平下的显著性检验。

根据式 (1) 和表 2 中得到的模型参数，在地级市尺度上模拟中国各地级市的能源消费总量，构建中国 1995–2009 年的能源消费空间格局。图 2 是利用夜间灯光数据模拟的 1995 年和 2009 年的中国分地市的能源消费总量图。

中国大陆除去西藏之外，能源消费总量由 1995 年的 11.25 亿 tce，逐渐上升至 2009 年的 32.86 亿 tce，各市能源消费量平均值也呈现逐渐上升的趋势。能源消费量的绝对差异由

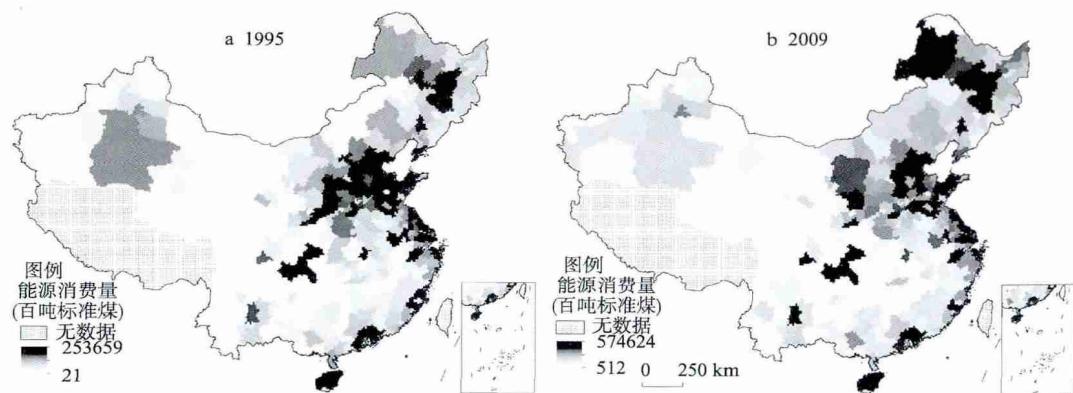


图2 1995年和2009年中国地级市能源消费量模拟结果

Fig. 2 Results of energy consumption simulation of prefecture-level cities in China in 1995 and 2009

标准差来衡量，由表3可见，能源消费量的绝对差异逐渐变大。各地级市能源消费量的年平均增长率，呈现波动状态，2004年能源消费量的增长率达到最高，之后能源消费量的增长率逐渐降低。

模型验证是衡量模型应用效果的重要步骤^[28]。通过检验统计值和模拟值相对误差的方式对精度进行直观评价^[17]。以中国30个省级区域作为验证样本，计算出1995-2009年30个省级行政区能源消费量模拟值和统计值之间的平均相对误差（图3）。平均相对误差最大为-16.17%，最小为-1.4%，而李通等^[24]在夜间灯光数据和电力消费的研究中，1995年、2000年和2009年的平均相对误差分别为-27.67%、-31.71%和-33.49%，这说明夜间灯光数据同样可以应用于研究能源消费总量，且精度较高，具有一定的可信度。这进一步表明，基于DMSP/OLS夜间灯光数据模拟的能源消费量，精度较高，模拟结果可信。由图3可见，每一年的模拟值和统计值之间的相对

表3 中国能源消费量

Tab. 3 Energy consumption of China

年份	总量(10^2 tce)	市均值(10^2 tce)	标准差	能源消费量年平均增长速度(%)
1995	11245705	33771	33934	
1996	11555347	34700	34944	2.75
1997	11430465	34325	34787	-1.08
1998	11860597	35617	35498	3.76
1999	12035885	36143	35064	1.48
2000	12717885	38191	35256	5.67
2001	13502088	40547	38610	6.17
2002	14868962	44652	42143	10.12
2003	16587772	49813	50854	11.56
2004	21226553	63743	59445	27.97
2005	23526965	70652	71344	10.84
2006	27714240	83226	78333	17.80
2007	30425716	91369	79398	9.78
2008	32046870	96237	85109	5.33
2009	32863408	98689	90882	2.55

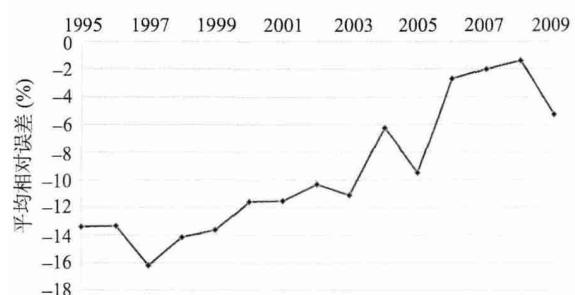


图3 1995-2009年中国30个省级行政区平均相对误差

Fig. 3 The average relative error in 30 provinces in China, 1995-2009

误差都是负值，这可能是因为存在的灯光饱和问题并没有在数据校正时完全消除，对于一些灯光强度较大的地市，误差较大。

3.2 分地市能源消费等级空间分异

根据中国30个省级行政区的夜间灯光数据和能源消费总量的关系，反演出中国1995-2009年15个年份分地市的能源消费总量。在ArcGIS中，计算出每个地市15年的平均能源消费量，并根据表1中的

标准差分级法，分为低、中等、较高和高能源消费区，分类结果见图4。较高和高能源消费区主要分布在中国东部沿海地区，高能源消费区集中分布在京津冀城市群、山东半岛城市群、长三角城市群、珠三角城市群、哈大长城市群、重庆市和四川成都市。

1995-2009年中国大陆能源消费总量以偏低消费为主，较高和高能源消费强度区主要分布在中国东部地区。全国范围内，能源消费总量偏低和中等地区的面积分别是390.12万km²和299.00万km²，二者之和占全国总面积的比例高达72.66%（图5）。从高能源消费强度区在各个经济区内的面积来看，59.05%的高能源消费强度区分布在中国东部，明显高于西部和中部（图5）。其中西部经济区中高能源消费强度的地级市是成都市和重庆市，很显然这两个地方都是省会城市或是直辖市，都是西部地区经济相对较发达的地区，因此能源消费量也较高。中部地区高能源消费强度区包括哈尔滨市、长春市和郑州市，这些地区相对与其他县市来说经济相对较发达，不管是工业能源消费还是生活能源消费量都较高，导致整体能源消耗较高。而东部地区，是全国经济最发达的地区，人类活动强烈，能源消

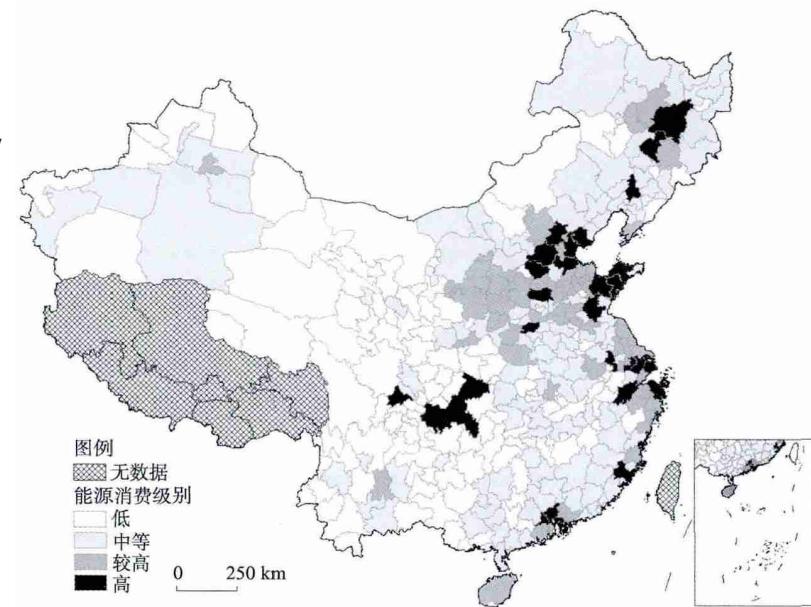


图4 中国各地级市1995-2009年能源消费分级

Fig. 4 Classification of energy consumption among cities in China from 1995 to 2009

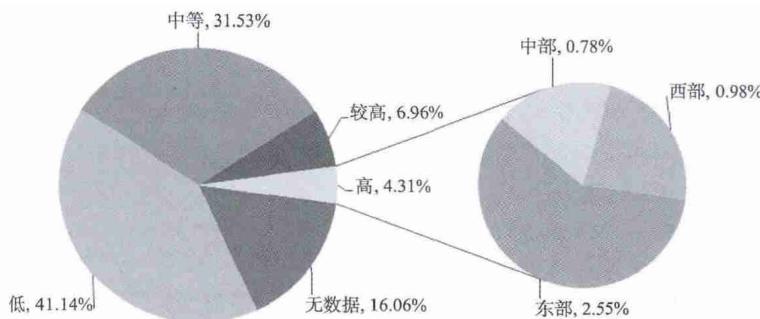


图5 各级别能源消费区面积占全国总面积的比例

Fig. 5 The area percentage of each energy consumption level in China

表4 1995-2009年各地级市能源消费量 Moran's *I* 指数
Tab. 4 Moran's *I* of energy consumption among cities, 1995-2009

年份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>I</i>	0.493	0.477	0.479	0.437	0.421	0.43	0.432	0.408	0.413	0.43	0.428	0.434	0.42	0.411	0.439
Z	14.25	13.79	13.85	12.68	12.22	12.41	12.51	11.81	12	12.44	12.43	12.56	12.11	11.86	12.63

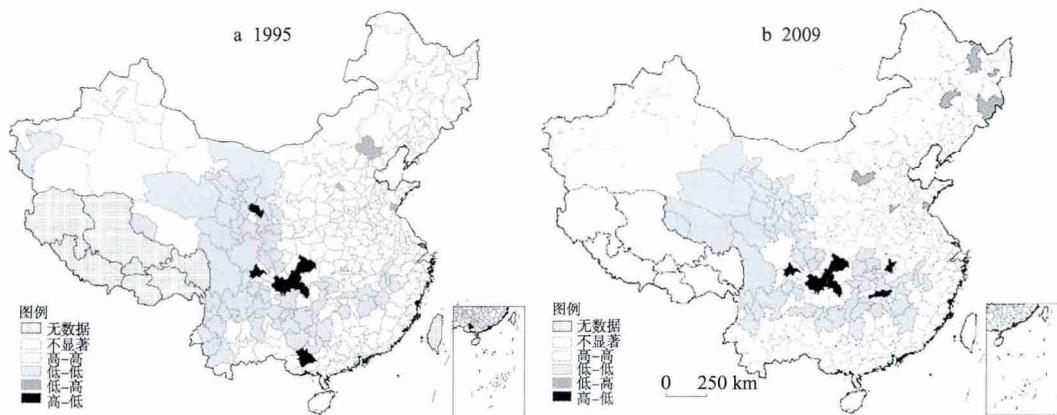


图6 1995-2009年能源消费的LISA图
Fig. 6 LISA of energy consumption from 1995 to 2009

费量较高。整体上呈现出东中西能源消费量逐渐递减的趋势。该结果与梁竞等对中国省会城市能源消费空间分布的研究结果相一致^[29]，进一步表明基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据估算能源消费的可靠性。

3.3 分地市能源消费空间自相关特征

应用 OpenGeoDa 软件进行空间自相关分析，选用基于 Queen 的邻接规则，计算出 1995-2009 年所有年份的 Global Moran's *I* 指数(表4)。所有年份的 Global Moran's *I* 值都大于 0.4，检验结果均通过了 0.05 的显著性检验，且 Z 值都在 10 以上，这表明中国能源消费具有明显的空间集聚性，即能源消费量较高的地级市空间聚集，能源消费量较低的地级市空间聚集。

根据公式 (5) 和 OpenGeoda 软件计算中国大陆各地级市自 1995-2009 年的能源消费量的 LISA 值，在 Z 检验的基础上 ($P < 0.05$)，绘制出 1995 年和 2009 年 LISA 集聚图(图6)。

对于空间单元与其周围单元属性的相近(正相关)和相异(负相关)程度，通常用 LISA 集聚图来衡量。由图6和表5可知：① 1995 年，显著 高 高 集聚区有 42 个，主要分布在京津冀都市圈、山东半岛城市群、山西省大部分地区以及长江三角洲和珠江三角洲的部分地区，这些地区经济发达，能源消费量大，空间集聚性强，与周边地区的能源消费紧密联系，辐射和带动作用较强；显著 低 低 集聚区有 59 个，主要分布在中国西部的四川、甘肃、青海、云南等省份的大部分地区以及中部省份湖南和江西的部分地区，这些地区是中国经济发展水平较低的地区，与周边联系较弱，能源消费量属于 低 低。

表5 按空间集聚特征统计的城市数量

年份	1995(个)	2000(个)	2005(个)	2009(个)
高 高	42	40	30	40
低 低	59	48	50	56
低 高	3	6	3	7
高 低	4	5	6	4
不显著	226	235	245	227

聚集；显著低高和显著高低聚集的地级市，数量较少，且不呈现出一定的规律性。② 2009年，显著高高聚集区有40个，在1995年的基础上，增加了哈大长城市群的主要地市，振兴东北老工业基地战略实施后，该地区经济发展较为迅速，以重工业为主的产业结构使得能源消费量较大，且与周边集聚性较强，山西省表现出高高空间集聚性的地市由原来的6个减少为1个；显著低低聚集区有56个，由中国西部地区，逐渐向中部地区转移；显著低高和显著高低聚集区由1995年的7个增加为11个，数量较少，还是不具有规律性。

4 结论

通常情况下，有关能源消费研究的数据均来自于统计年鉴。统计年鉴中关于能源消费总量的数据包括全国数据、分省数据以及个别城市个别年份的数据，缺失关于市级和县级的连续多年的能源统计数据。本文提出的利用DMSP/OLS夜间灯光数据模拟反演能源消费数据的方法为获取小尺度地区能源消费数据提供了一种全新方法，可以填补区域统计数据不足的缺陷。首先，利用DMSP/OLS夜间稳定灯光数据模拟反演能源消费数据具有一定的可行性。在数据获取方面，DMSP/OLS稳定夜间灯光数据可以从美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的国家地理数据中心（National Geophysical Data Center, NGDC）免费获得，可以下载全球的近20年的稳定夜间灯光数据；在方法方面，可以根据夜间灯光数据与大尺度能源消费总量之间的关系，来模拟反演小尺度上的能源消费，方法简便可行。其次，利用DMSP/OLS夜间稳定灯光数据模拟反演能源消费数据具有一定的可靠性。根据已有的夜间灯光数据和电力能源消费数据之间关系的研究，本文采用线性回归的方法来模拟反演能源消费总量，回归方式可靠^[21-23]。在模拟精度方面，各年份能源模拟值和统计值之间的平均相对误差最大为-16.17%，李通等^[24]在夜间灯光数据和电力消费的研究中，1995年、2000年和2009年的平均相对误差分别为-27.67%、-31.71%和-33.49%，这说明夜间灯光数据同样可以应用于研究能源消费总量，且精度较高，具有一定的可信度。

参考文献(References)

- [1] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹. 地理研究, 2010, 29, 29(9): 1639-1649. [Zhao Rongqin, Huang Xianjin. Carbon emission and carbon footprint of different land use types based on energy consumption of Jiangsu Province. Geographical Research, 2010, 29(9): 1639-1649.]
- [2] 徐铭辰, 王安建, 陈其慎, 等. 中国能源消费强度趋势分析. 地球学报, 2010, 31(5): 720-726. [Xu Mingchen, Wang Anjian, Chen Qishen, et al. Trend analysis of China's energy consumption intensity. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31 (5): 720-726.]
- [3] 武红, 谷树忠, 周洪, 等. 河北省能源消费、碳排放与经济增长的关系. 资源科学, 2011, 33(10): 1897-1905. [Wu Hong, Gu Shuzhong, Zhou Hong, et al. Relationship between energy consumption, carbon emissions and economic growth of Hebei Province. Resources Science, 2011, 33(10): 1897-1905.]
- [4] 张馨, 牛叔文, 丁永霞, 等. 中国省域能源资源与经济增长关系的实证分析: 基于 资源诅咒 假说. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2040-2051. [Zhang Xin, Niu Shuwen, Ding Yongxia, et al. Empirical analysis of the relationship between energy resource and economic growth in provinces of China based on "resource curse" hypothesis. Journal of Natural Resources, 2010, 25(12): 2040-2051.]
- [5] 刘佳骏, 董锁成, 李宇. 产业结构对区域能源效率贡献的空间分析: 以中国大陆31省(市、自治区)为例. 自然资源学报, 2011, 26(12): 1999-2011. [Liu Jiajun, Dong Suocheng, Li Yu. Spatial analysis on the contribution of industrial structure change to regional energy efficiency: A case study of 31 provinces in Mainland China. Journal of Natural Resources, 2011, 26(12): 1999-2011.]

- [6] 国涓, 王玲, 孙平. 中国区域能源消费强度的影响因素分析. 资源科学, 2009, 31(2): 205-213. [Guo Juan, Wang Ling, Sun Ping. The analysis of factors affecting regional energy consumption intensity in China. Resources Science, 2009, 31(2): 205-213.]
- [7] 贾俊松, 范英, 吴晓华, 等. 全球能源消费的空间差异及影响因素分析. 资源科学, 2011, 33(5): 796-805. [Jia Junsong, Fan Ying, Wu Xiaohua, et al. Spatial differences and influencing factors of global energy consumption. Resources Science, 2011, 33(5): 796-805.]
- [8] 梁竟, 张力小. 基于 Theil 指数的城市能源消费空间差异测度分析. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(3): 85-88. [Liang Jing, Zhang Lixiao. The measure and analysis on the spatial inequality of urban energy consumption in China based on Theil index. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(3): 85-88.]
- [9] 原艳梅, 林振山, 徐志华. 基于人口、经济的我国能源可持续发展的动力学研究. 自然资源学报, 2009, 24(5): 791-798. [Yuan Yanmei, Lin Zhenshan, Xu Zhihua. The dynamic research on the energy for sustainable development based on the population and economy of China. Journal of Natural Resources, 2009, 24(5): 791-798.]
- [10] 王鹤饶, 郑新奇, 袁涛. DMSP/OLS 数据应用研究综述. 地理科学进展, 2012, 31(1):11-19. [Wang Herao, Zheng Xinqi, Yuan Tao. Overview of researches based on DMSP/OLS nighttime light data. Progress in Geography, 2012, 31 (1): 11-19.]
- [11] Imhoff L Marc, Lawrence T William, Stutter C David, et al. A technique for using composite DMSP/OLS "City Lights" satellite data to map urban area. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(3): 361-370.
- [12] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究: 反映区域城市化水平的灯光指数的构建. 遥感学报, 2003, 7(3): 168-175. [Chen Jin, Zhuo Li, Shi Peijun, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: Development of a light index for urbanization level estimation. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(3): 168-175.]
- [13] 何春阳, 李景刚, 陈晋, 等. 基于夜间灯光数据的环渤海地区城市化过程. 地理学报, 2005, 60(3): 409-417. [He Chunyang, Li Jinggang, Chen Jin, et al. The urbanization model and process in Bohai Sea surrounding area in the 1990s by using DMSP/OLS data. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(3): 409-417.]
- [14] 卓莉, 李强, 史培军, 等. 基于夜间灯光数据的中国城市用地扩展类型. 地理学报, 2006, 61(2): 169-178. [Zhuo Li, Li Qiang, Shi Peijun, et al. Identification and characteristics analysis expansion types in China in the 1990s based on urban land DMSP/OLS data. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(2): 169-178.]
- [15] 王跃云, 徐昀, 朱喜钢. 江苏省城镇建设用地扩展时空格局演化: 基于 1993 年、1998 年、2003 年度夜间灯光数据的分析. 现代城市研究, 2010, (2): 67-73. [Wang Yueyun, Xu Di, Zhu Xigang. The spatio-temporal characteristics of the urban and town construction land expansion in Jiangsu Province from DMSP/OLS nighttime images. Modern Urban Research, 2010, (2): 67-73.]
- [16] Sutton P, Roberts D, Elvidge C, et al. A comparison of nighttime satellite imagery and population density for the continental United States. American Society for Photogrammetric and Remote Sensing, 1997, 63(11): 1303-1313.
- [17] Lo C P. Modeling the population of China using DMSP operational linescan system nighttime data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(9):1037-1047.
- [18] 卓莉, 陈晋, 史培军, 等. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟. 地理学报, 2005, 60(2): 266-276. [Zhuo Li, Chen Jin, Shi Peijun, et al. Modeling population density of China in 1998 based on DMSP/OLS nighttime light image. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2): 266-276.]
- [19] Gallo K P, Tarpley J D, McNab A L, et al. Assessment of urban heat islands: A satellite perspective. Atmospheric Research, 1995, 37(1-3): 37-43.
- [20] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响. 地理学报, 2007, 62(7): 717-727. [Xie Zhiqing, Du Yin, Zeng Yan, et al. Impact of urbanization on regional temperature change in the Yangtze River Delta. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 717-727.]
- [21] Elvidge, C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. Relations between satellites observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(6): 1373-1379.
- [22] Amaral Silvana, Camaraet Gilberto, Monteiro Antonio Miguel Vieira Monteiro, et al. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data. Computers, Environment and Urban Systems, 2005, 29(2):179-195.
- [23] Chand T R K, Badarinath K V S, Elvidge C D, et al. Spatial characterization of electrical power consumption patterns over India using temporal DMSP/OLS nighttime satellite data. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(3): 647-661.
- [24] 李通, 何春阳, 杨洋, 等. 1995-2008 年中国大陆电力消费量时空动态. 地理学报, 2011, 66(10): 1403-1412. [Li Tong,

- He Chunyang, Yang Yang, et al. Understanding electricity consumption changes in China Mainland from 1995 to 2008 by using DMSP/OLS stable nighttime light time series data. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(10): 1403-1412.]
- [25] Wu Jiansheng, He Shengbin, Peng Jian, et al. Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by using invariant region method. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7356-7368.
- [26] 张秋亮, 白永平, 赵明. 内蒙古县域经济的时空变化研究. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(10): 150-155. [Zhang Qiuliang, Bai Yongping, Zhao Ming. The temporal and spatial variation of the county economy in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(10): 150-155.]
- [27] 关伟, 朱海飞. 基于ESDA的辽宁省县际经济差异时空分析. *地理研究*, 2011, 30(11): 2008-2016. [Guan Wei, Zhu Haifei. Spatiotemporal analysis of inter-county economic differences in Liaoning Province based on ESDA. *Geographical Research*, 2011, 30(11): 2008-2016.]
- [28] 杨眉, 王世新, 周艺, 等. 基于DMSP/OLS影像的城市化水平遥感估算方法. *遥感信息*, 2011, 26(4): 100-106. [Yang Mei, Wang Shixin, Zhou Yi, et al. A method of urbanization level estimation using DMSP/OLS imagery. *Remote Sensing Information*, 2011, 26(4): 100-106.]
- [29] 梁竟, 张力小. 中国省会城市能源消费的空间分布特征分析. *资源科学*, 2009, 31(12): 2086-2092. [Liang Jing, Zhang Lixiao. Analysis on spatial distribution characteristics of urban energy consumption among capital cities in China. *Resources Science*, 2009, 31(12): 2086-2092.]

Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS Nighttime Light

WU Jiansheng^{1,2}, NIU Yan¹, PENG Jian^{1,2}, WANG Zheng³, HUANG Xiulan¹

- (1. The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, School of Urban Planning & Design, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China;
 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
 3. Housing and Urban-Rural Development Bureau of Nanhu District, Jiaxing 314051, Zhejiang, China)

Abstract: Energy is an important support of the development of the national economy. Getting dynamic information of the total energy consumption, conveniently and accurately, has important reference significance(s) for making energy policy, rationally. Using DMSP/OLS nighttime lights data, this paper simulates the spatiotemporal pattern of energy consumption among the cities of Chinese mainland from 1995 to 2009, in a prefecture-level city scale; the application of spatial autocorrelation method reveals the spatial and temporal characteristics of the energy consumption in Chinese mainland during the study period. The results show that: simulating energy consumption among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS Nighttime Light is feasible. DMSP/OLS nighttime lights data can reflect the spatial and temporal dynamics of energy consumption more reliably. The energy consumption of most cities is lower in Chinese mainland from 1995 to 2009. Lower and middle intensity energy consumption area accounted for 72.66% of the country's total area. High intensity energy consumption areas are mainly located in the eastern part of China. There is a significant spatial aggregation in energy consumption in China (Moran's *I* index over the years is greater than 0.4). There is a high-high aggregation and a low-low aggregation phenomenon of energy consumption among prefecture-level cities in China.

Key words: DMSP/OLS; energy consumption simulation; spatial autocorrelation; prefecture-level cities