

# 基于遥感数据的 PM2.5 与城市化的时空关系研究

## ——以成渝城市群为例<sup>1</sup>

吴浪<sup>1, 2</sup>, 周廷刚<sup>1, 2</sup>, 温莉<sup>1, 2</sup>, 刘晓璐<sup>1, 2</sup>, 朱晓波<sup>1, 2</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715)

**【摘要】:** 采用 1998~2013 年卫星遥感影像反演的 PM2.5 全球高精度产品数据集, 结合 GIS 空间分析、地理加权回归 (GWR) 以及地理探测器等方法, 系统地分析了成渝城市群城市化与 PM2.5 分布之间的关系。结果表明: (1) 1998~2013 年成渝城市群城市化速度较快, 城市区域的 PM2.5 均值明显高于非城市区域, 说明城市化对 PM2.5 具有一定的影响; (2) 近 16a PM2.5 重心与城市重心整体上都向东南方向移动, 且两者每年在经度上的波动方向基本相反; (3) 夜间灯光数据与 PM2.5 在空间分布上具有较好的一致性, 且 1998~2013 年两者的 GWR 全局 R<sup>2</sup> 在 0.86~0.95 之间, 相关性显著, 研究区内城市化和人类活动对 PM2.5 的分布具有明显影响; (4) 地理探测分析表明不同城市化因子对 PM2.5 影响差异显著, 从 2006 到 2013 年城区人口密度和建成区绿化覆盖率逐渐成为成渝城市群 PM2.5 分布的主要影响因子。

**【关键词】:** PM2.5 夜间灯光影像 地理加权回归 城市化 地理探测器

**【中图分类号】:** X513 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2018) 09-2142-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201809024

清洁的空气被视为人类生存的基本需求。PM2.5 与城市化关系的研究主要是使用城市 PM2.5 实时监测数据, 以社会经济统计数据表征城市化水平和人类活动强度, 探究城市化与 PM2.5 之间的关系<sup>[1]</sup>。由于监测 PM2.5 的地面站点较少且监测时间较短, 只能反应部分区域短时间的变化特征。PM2.5 卫星遥感反演产品可以提供大尺度以及长时间序列的 PM2.5 数据, 有效弥补地面监测资料的缺乏。VanDonkelaaret 等<sup>[2]</sup>通过海量文献搜索获得了全球 210 个 PM2.5 地面站点的数据, 对该 PM2.5 数据集进行精度评估, 发现两者相关系数达到 0.81, 具有显著相关性, 证明 PM2.5 遥感反演产品土全可以有效应用于国家和地区尺度的 PM2.5 研究<sup>[3-5]</sup>。因此, 高质量、高精度、长时间序列的卫星遥感数据是监测 PM2.5 变化的有效手段<sup>[6]</sup>。

城市化作为一个涉及人口、土地、经济、地域空间等诸多方面的综合过程, 由于统计数据具有复杂性、滞后性、成本高等局限, 很难快速便捷的估算区域城市化水平。DMSP/OLS (the Defense Meteorological Satellite Program/the Operational Linescan System) 连续高分辨率数据能够良好的监测人类活动强度<sup>[7]</sup>, 在城镇扩展研究<sup>[8-10]</sup>、社会经济因子评估<sup>[11-13]</sup>中有着广

<sup>1</sup>收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2018-01-12

**基金项目:** 国务院三峡办三峡后续工作库区生态与生物多样性保护专项项目“重庆库区重要支流(涪陵-巫山段)水生生境状况调查与评估”(500000201BB5200002)

**作者简介:** 吴浪 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail: lang\_grace@yeah.net

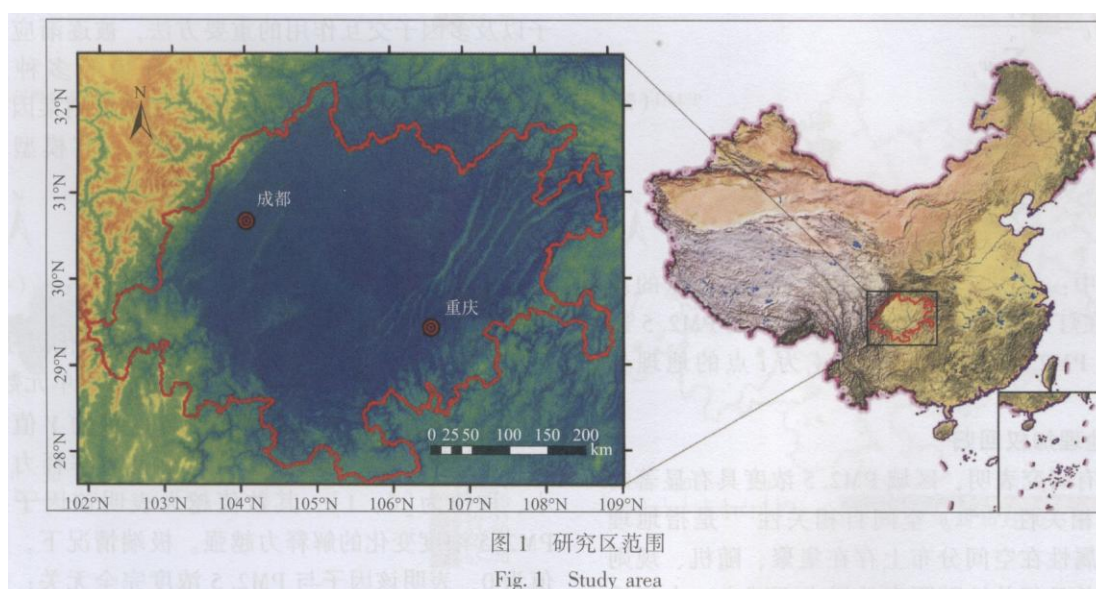
通讯作者 E-mail: zhoutg@163.Com

泛的应用，能良好的评估城市化水平<sup>[14, 15]</sup>。

成渝城市群作为西部地区经济发展好、人口集中的区域，快速城市化和人类活动引起的 PM2.5 等污染物的排放显著增加。由于该区域位于四川盆地，PM2.5 不易消散，成为 PM2.5 污染的重灾区之一。对于该区域长期的 PM2.5 相关研究较少，仅针对区域内成都<sup>[16]</sup>、重庆<sup>[17]</sup>等城市，缺乏对于整个城市群区域大尺度、长时间序列系统分析 PM2.5 分布规律以及与城市化关系的研究。1998 年到 2013 年是中国城镇化、工业化发展最为快速的阶段，本文利用 1998~2013 年 PM2.5 卫星遥感反演产品展开成渝城市群 PM2.5 时空分布及其与城市化的关系探析，可以较为精准、全面、长时间序列地反映成渝城市群细颗粒物浓度的变化情况，一定程度上补充了 1998-2013 年以来该区域 PM2.5 浓度监测宏观数据的缺失问题。研究结果可能对于成渝城市群未来城市化发展的污染风险规避提供一定依据，为城市群大气污染联动治理提供空间信息参考。

## 1 研究区域与研究数据

### 1.1 研究区概况



成渝城市群位于四川盆地，包括重庆市 29 个区(县)和四川省的 15 个地级市，总面积  $18.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。作为西部经济基础最好、实力最强的区域之一，本文选取成渝城市群作为研究对象。

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据

本文使用来源于 NOAA 国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)发布的 1998~2013 年 DMSP/OLS 非辐射定标稳定灯光数据 (Version4)。该数据为夜间灯光强度年度合成栅格数据，DN 值为 0~63，包括了城市、乡镇及其他持久光源的灯光，并且去除了月光云、燃烧火点等偶然噪声的影响，空间分辨率为 30 弧秒。

#### 1.2.2 PM2.5 遥感反演数据集

---

PM2.5 数据集来源于哥伦比亚大学的国际地球科学信息网络中心 (CIESIN) 的社会经济数据与应用中心 (sedac), 该数据由 MODIS、MISR 和 SeaWiFS 气溶胶光学厚度 (AOD) 联合反演得到的全球逐年 PM2.5 格网产品。该产品分辨率为  $0.1^\circ$ , 覆盖范围为  $70^\circ \text{ N} \sim 55^\circ \text{ S}$ 。

### 1.2.3 统计数据

主要来源于《中国城市建设统计年鉴》(2006-2013)、《四川统计年鉴》(2006-2013)、《重庆统计年鉴》(2006-2013)。

### 1.2.4 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 研究方法

本研究旨在探讨成渝城市群 PM2.5 长时间变化和空间分布规律, 并用重心迁移法、地理加权回归和地理探测器研究 PM2.5 与城市化的关系。

### 2.1 数据处理

#### 2.1.1 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据校正

由于 1998 到 2013 年的 DMSP 夜间灯光数据

通过不同卫星获得, 不同传感器对灯光的感应有所差异, 因此在使用数据前利用文献 10 的不变目标法对灯光数据进行相对校正, 校正模型为:

$$DN_{\text{correct}} = a \times DN^2 + b \times DN + c \quad (1)$$

式中:  $DN$  和  $DN_{\text{correct}}$  为校正前后的灰度值;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  为参数。

#### 2.1.2 数据预处理

PM2.5 数据和经校正后的 DMSP 夜间灯光数据坐标为 WGS\_1984, 所有空间数据统一转换为 Albers Equal Area 投影, 地理参考为北京 54 坐标系。重采样为 1km, 并根据研究范围进行裁剪。

### 2.2 重心迁移

重心是指研究区域内某一属性值在特定时刻在空间平面上力矩达到平衡的点<sup>[18]</sup>, 区域内某属性的变化轨迹和空间差异性可以通过重心变动体现出来。本文采用加权平均模型来计算城市重心和 PM2.5 污染重心, 公式如下:

$$\begin{cases} X_G = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \\ Y_G = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $X_G$ 、 $Y_G$ 为重心坐标； $w_i$ 为第  $i$  点的灰度值(在灯光数据中为灯光强度值，在 PM2.5 影像中为 PM2.5 浓度值)； $x_i$ 、 $y_i$ 为  $i$  点的地理坐标。

### 2.3 地理加权回归

已有研究表明，区域 PM2.5 浓度具有显著的空间自相关性<sup>[19,20]</sup>。空间自相关性<sup>[21]</sup>是指地理事物或属性在空间分布上存在集聚、随机、规则分布，并且相关性随距离的增大而减少。大气活动所具有的空间相关性特征表现为区域内相邻的区县因其地形、气候、人类活动程度的相似导致 PM2.5 浓度值在统计上更加接近<sup>[22]</sup>，利用一般的传统回归方法研究 PM2.5 与夜间灯光数据之间的关系，其结果并不可靠<sup>[23]</sup>。

地理加权回归(Geographical Weighted Regression, GWR)是在传统回归分析的基础上，充分考虑空间事物的自相关性，将属性数据和空间位置结合，其回归结果更加可信<sup>[24]</sup>。本研究利用夜间灯光数据与 PM2.5 浓度数据，建立 GWR 回归模型<sup>[25]</sup> (式 3)：

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \beta_1(\mu_i, \nu_i) x_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中： $y_i$ 为第  $i$  个点的 PM2.5 浓度值； $x_i$ 为第  $i$  个点的灯光灰度值； $(\mu_i, \nu_i)$ 为  $i$  第个点的空间地理位置坐标； $\beta_i$ 是第  $i$  个点上的相应的回归参数，是地理位置函数； $\varepsilon_i$ 为残差， $i$  为 1, 2, ..., n, 表示样本点个数。当样本回归参数不受空间位置影响时，即  $\beta$  保持不变，则 GWR 退化为全局回归模型。

根据 PM2.5 与夜间灯光的 GWR 模型，以 1998~2013 年的 PM2.5 浓度数据为因变量，相应年份的夜间灯光数据为自变量，对成渝城市群 PM2.5 进行空间回归分析，揭示 PM2.5 与城市化之间的相关关系。

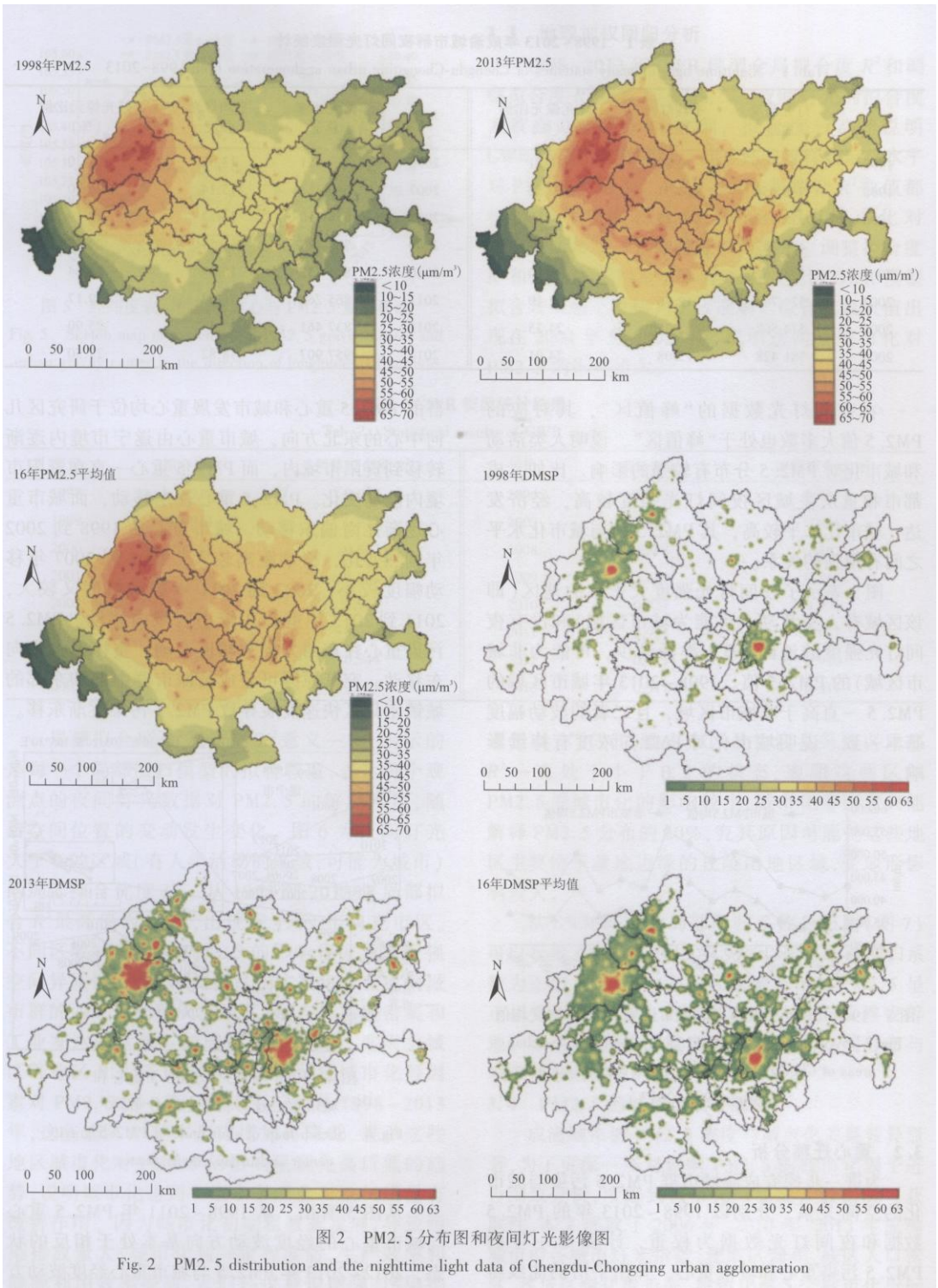
### 2.4 地理探测器

地理探测器(GeoDetector, GD)是探测空间现象分异性，以揭示其背后驱动力的一种统计学方法<sup>[26]</sup>。其作为一种探究各种现象驱动力和影响因子以及多因子交互作用的重要方法，被逐渐应用于土地利用、区域经济、生态环境等多种领域<sup>[27~29]</sup>。该方法的因子探测器是用来检测某因子对某现象空间分布差异的影响程度，其模型如下：

$$Q_D = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中：D 为 PM2.5 浓度变化的城市化因子；h 为分类数； $N^h$  和 N 分别为类 h 和全部的单元数； $\sigma_h^2$  与  $\sigma^2$  分别为类别 h 区域与全部区域的 Y 值的方差； $Q_h$  为 D 因子对 PM2.5 的驱动力解释力大小，取值为 [0, 1]，其数值越大表明该因子对 PM2.5 浓度变化的解释力越强。极端情况下，数值为 0，表明该因子与 PM2.5 浓度完全无关；数值为 1，表明该因子可以完全解释 PM2.5 浓度分布。

### 3 结果与讨论



### 3.1 PM2.5 与夜间灯光分布特征

从成渝城市群的 PM2.5 分布图和夜间灯光影像图(图 2)可以看出, 2013 年的灯光像元面积和强度都远远大于 1998 年, 反映了 16a 成渝城市群的飞速发展。表 1 是 1998~2013 年成渝城市群夜间灯光强度统计, 夜间灯光总强度从 1998 年的 289196 增加到 2013 年的 957907, 平均灯光强度和灯光像元占区域总像元比例都总体呈上升趋势, 表明成渝城市群 1998 年以来城市化过程持续进行, 城市化质量比较好。

表 1 1998-2013 年成渝城市群夜间灯光强度统计

Tab. 1 Nighttime light intensity statistics of Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 1998-2013

年份	灯光强度 总量	平均灯光 强度	灯光像元比例 (%)	年份	灯光强度 总量	平均灯光 强度	灯光像元比例 (%)
1998	289 196	12.80	12.21	2006	610 551	13.58	24.30
1999	308 058	13.31	12.50	2007	649 322	13.14	26.70
2000	372 623	12.25	16.44	2008	636 910	14.22	24.19
2001	405 747	12.07	18.17	2009	702 428	15.54	24.42
2002	474 362	12.15	21.10	2010	814 832	15.37	28.64
2003	521 741	12.76	22.10	2011	865 265	16.03	29.17
2004	574 502	12.75	24.35	2012	837 461	17.47	25.90
2005	581 428	13.08	24.01	2013	957 907	18.82	27.50

在夜间灯光数据的“峰值区”, 其对应的 PM2.5 值大多数也处于“峰值区”, 说明人类活动和城市化对 PM2.5 分布有较强的影响。比如, 成都市和重庆主城区夜间灯光强度较高, 经济发达, 城市化水平较高, 其 PM2.5 值与城市化水平之间有很强的关系。

图 3 表示了夜间灯光强度大于 0 的地区(即该区域有人类活动, 可能为城市区域)和没有夜间灯光强度的地区(即人类活动少, 可能为非城市区域)的 PM2.5 值。1998~2013 年城市区域的 PM2.5 一直高于非城市区域, 且二者的波动幅度基本一致。说明城市化对 PM2.5 浓度有持续影响。

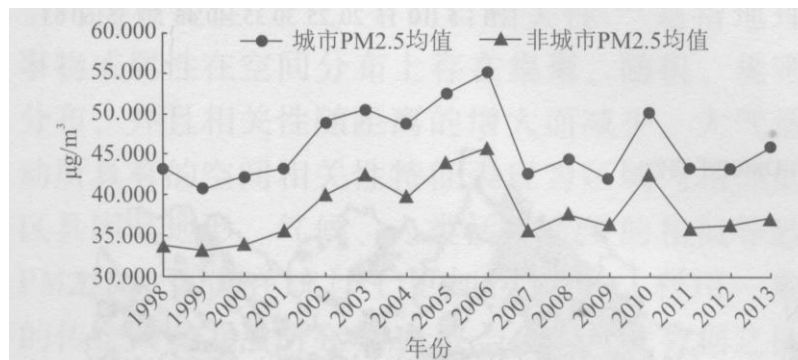
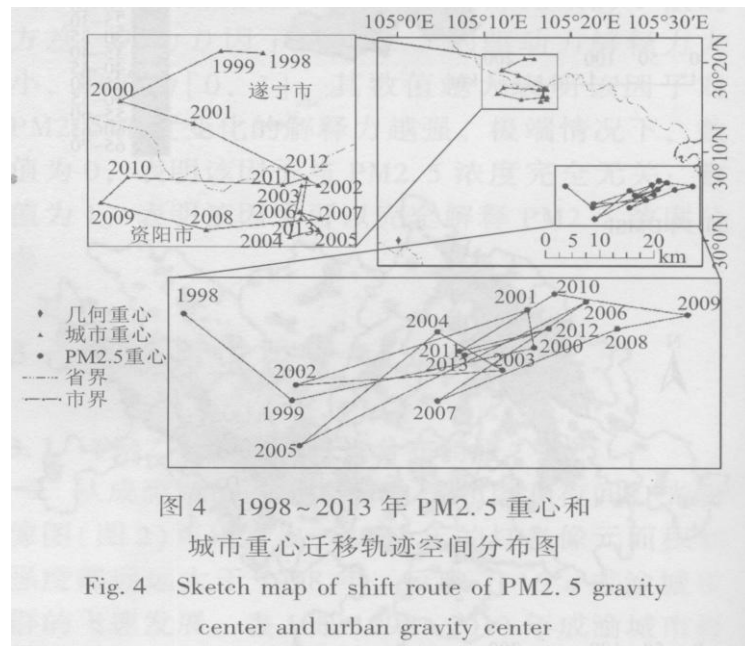


图 3 1998~2013 年城市与非城市区域 PM2.5 浓度均值

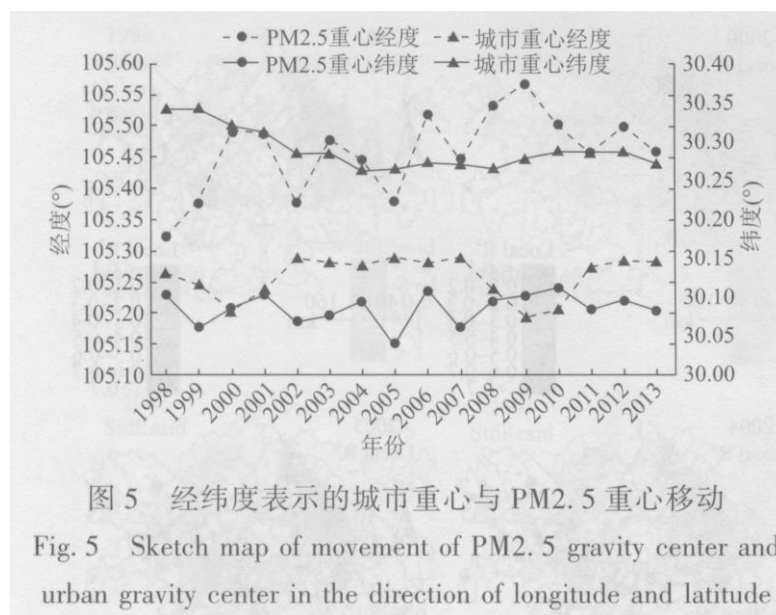
Fig. 3 Average values of PM2.5 in urban and non-urban areas of Chengdu-Chongqing urban agglomeration during 1998-2013

### 3.2 重心迁移分析

为进一步探究成渝城市群 PM2.5 污染与城市化的空间关系，分别以 1998~2013 年的 PM2.5 数据和夜间灯光数据为权重，计算每一年的 PM2.5 污染重心和城市重心，并用平滑的曲线将各重心连接，以挖掘长时间序列下的 PM2.5 与城市化的空间特征及其相关关系（图 4），成渝城市群的 PM2.5 重心和城市发展重心均位于研究区几何中心的东北方向，城市重心由遂宁市境内逐渐转移到资阳市境内，而 PM2.5 重心一直在资阳市境内波动变化。PM2.5 重心往东移动，而城市重心逐渐往南偏东移动。城市重心从 1998 到 2002 年剧烈变化，移动距离较大，2002 到 2007 年移动幅度较小，2007 到 2011 年移动幅度又较大，2011 到 2013 年重心在较小区域内移动。PM2.5 污染重心在东西方向大幅度变动，整体上大致向东移动。究其原因可是成渝城市群中部和东部的城镇密集区快速发展导致 PM2.5 污染逐渐东移。



从图 5 看出，从 1998~2011 年 PM2.5 重心与城市重心的经度波动方向基本处于相反的状态，2012~2013 年 PM2.5 与城市重心经度波动方向一致，说明两者在东西方向上具有一定的关系，纬度方向两者的波动无明显关系。



### 3.3 地理加权回归分析

1998~2013年GWR模型全局拟合度 $R^2$ 和调整拟合度见表2。PM<sub>2.5</sub>与夜间灯光的拟合度大致在0.86~0.95之间,拟合度较高,说明GWR模型拟合效果佳,能很好的解释城市化水平对PM<sub>2.5</sub>的影响。1998~2013年拟合数值都相差不大且都在0.86以上,说明城市化对PM<sub>2.5</sub>的影响一直维持在较高水平。调整拟合度 $R^2$ 和拟合度相差基本为0.01,说明GWR模型拟合效果稳定可信,比较准确。拟合度最大值出现在2004年和2005年,说明这两年城市化对PM<sub>2.5</sub>的影响最大。

表2 GWR模型统计结果

Tab. 2 Statistical results of GWR model

年份	拟合度 $R^2$	调整拟合度 $R^2$	年份	拟合度 $R^2$	调整拟合度 $R^2$
1998	0.915	0.915	2006	0.937	0.937
1999	0.913	0.912	2007	0.937	0.936
2000	0.868	0.867	2008	0.898	0.897
2001	0.864	0.864	2009	0.865	0.864
2002	0.915	0.915	2010	0.927	0.926
2003	0.911	0.910	2011	0.931	0.931
2004	0.945	0.944	2012	0.911	0.910
2005	0.945	0.945	2013	0.911	0.911

局部拟合度 $R^2$ 与全局 $R^2$ 意义一样,表示的是每一个局部回归模型的拟合程度,表达每个观测点的夜间灯光数据对PM<sub>2.5</sub>的解释程度,随着空间位置的变动发生变化。图6为夜间灯光大于0的区域(有人类活动的区域,可能为城市)的局部拟合优度 $R^2$ 。从1998到2013年局部拟合最高值为0.75,出现在1999年南充市区。不同区域城市化对PM<sub>2.5</sub>的影响程度具有较强空间异质性,局部 $R^2$ 高值区的主要集中在成渝城市群的西北部和重庆主城区,是人口高度密集和工业发达的区域。如成都东部、德阳、重庆主城区等地区 $R^2$ 大于0.5,表明这些区域城市化等因素对PM<sub>2.5</sub>的一直有较大影响。从1998~2013年,这些地区 $R^2$ 基本是先增加再降低,表示这些地区城市化对PM<sub>2.5</sub>的影响呈现先高后低的趋势,说明城市化达到一定水平后会对空气质量有改善作用。因为城市化初期粗放式发展,导致污染排放量大;城市化到一定程度后,生产效率和能源利用效率提高,人们环保意识增强,污染排放量逐渐降低,符合环境库兹涅茨曲线(EKC)。达州市、广安市、雅安市以及垫江县等地区局部一直处于小于0.2的状态,表明这些区域PM<sub>2.5</sub>受城市化的影响较小,城市化等因素只能解释PM<sub>2.5</sub>分布的20%,究其原因可能是这些地区主要位于盆地边缘的丘陵山地区域,受地形影响较大。

从GWR模型的局部回归系数分布图(图7)可以看出,1998到2013年97%以上区域的回归系数为正值,表明绝大多数区域城市化与PM<sub>2.5</sub>呈正相关。而负相关主要出现在达州以及雅安等地。综上所述,成渝城市群PM<sub>2.5</sub>的空间分布与城市化有着密切的关系。

### 3.4 PM<sub>2.5</sub>的城市化因子解析

成渝城市群PM<sub>2.5</sub>浓度与城市化关系差异显著,为了更深一步对影响PM<sub>2.5</sub>的城市化因子进行细致分析,考虑到城市化指标统计数据的可获取性,本文选取了2006年、2010年、2013年成渝城市群各城市灯光指数、建成区面积、城区人口密度、建成区绿化覆盖率、城镇化率5个城市化指标因子对城区PM<sub>2.5</sub>影响程度进行计算(表3)。

通过地理探测对成渝城市群PM<sub>2.5</sub>浓度影响因子分析表明,在2006年、2010年和2013年3个时间断面上,以灯光指数为代表的综合城市化水平对PM<sub>2.5</sub>解释力为0.2533,0.2492和0.1966,对PM<sub>2.5</sub>浓度贡献较大,但随城市化水平提高逐渐降低,符合前文GWR回归结果。建成区面积和城镇化率在2006年解释力较大,在2010和2013年却明显降低。2006年到2013年城市化发展由PM<sub>2.5</sub>排放量大的粗放型土地扩张模式逐渐转型为PM<sub>2.5</sub>排放量小的高密度、复合型的土地使用模式,总体上建成区面

积对 PM2.5 解释力由显著逐渐变为不显著。城区人口密度对 PM2.5 解释力逐渐增大，说明人口的高密度聚集对 PM2.5 影响较大，逐渐成为影响城区 PM2.5 浓度的主要因素之一。建成区绿化覆盖率的解释力也由 2006 年的 0.1478 逐渐增加到 2013 年的 0.6071，说明城区的绿化能显著的降低 PM2.5 污染，影响效果越来越强。

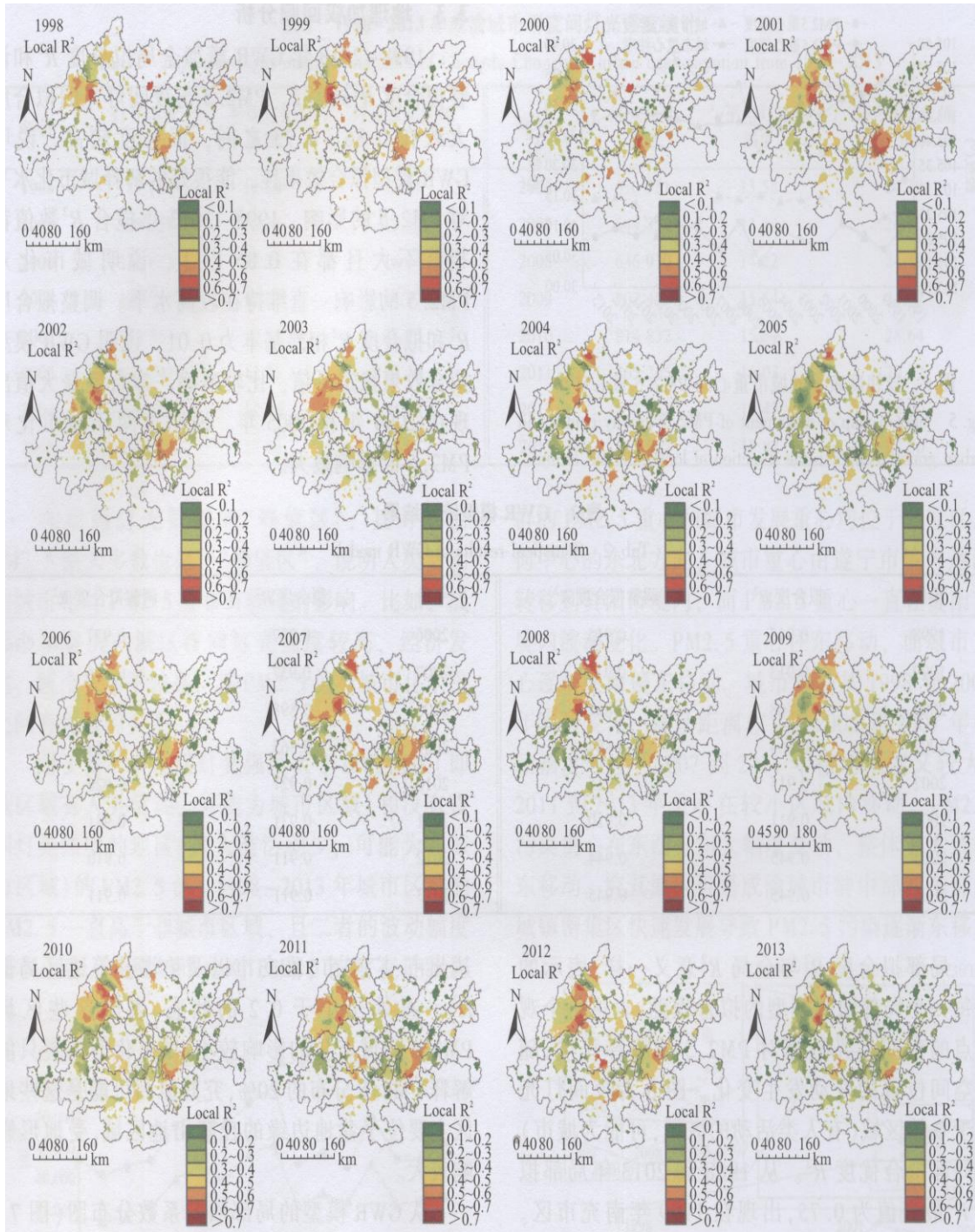


图 6 1998~2013 年 PM2.5 与夜间灯光数据的 GWR 模型回归局部拟合度  $R^2$  的空间分布

Fig. 6 Maps of local  $R^2$  from GWR model between PM2.5 and nighttime light values in Chengdu-Chongqing urban agglomeration during 1998–2013

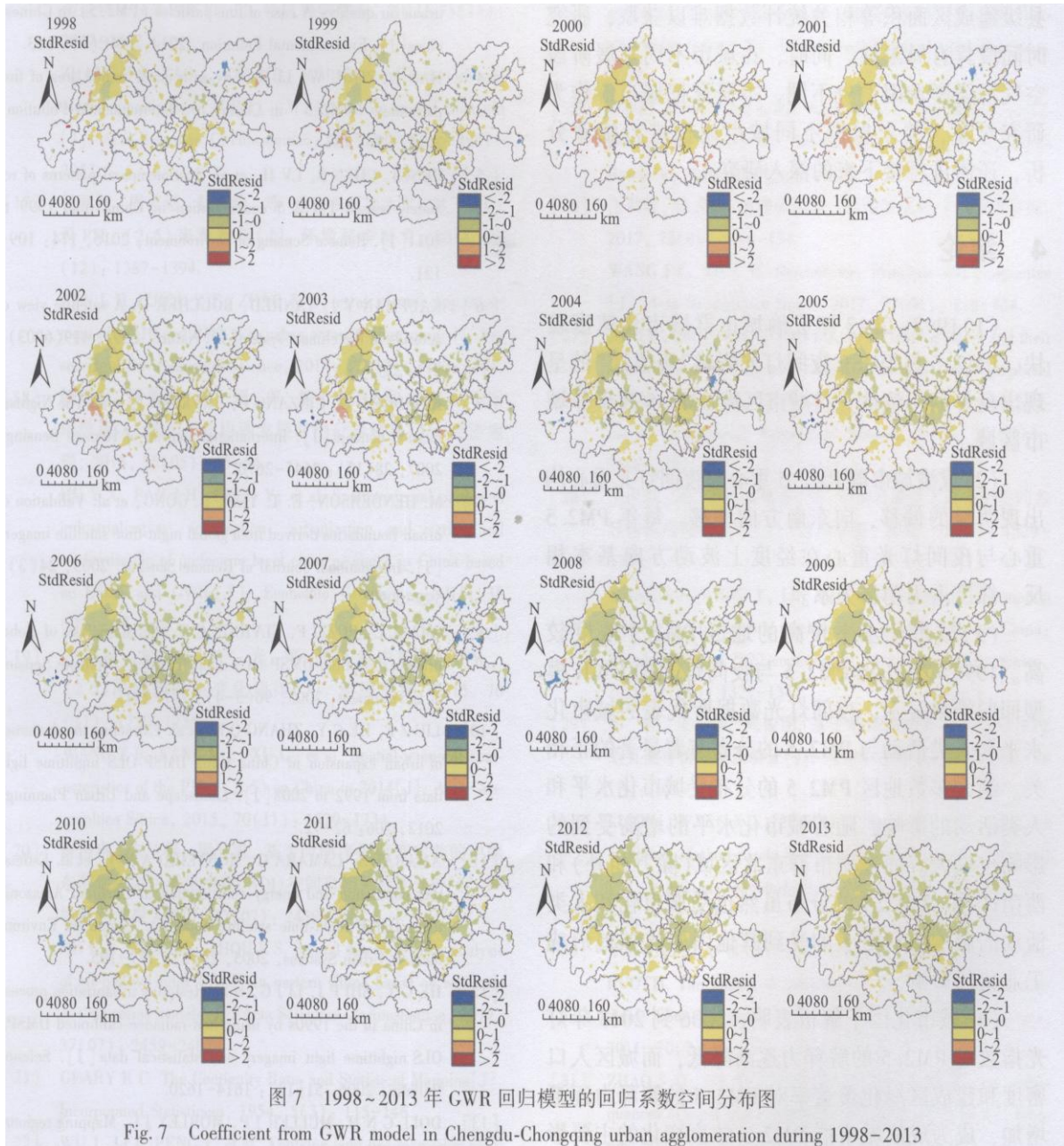


表 3 PM2.5 因子探测结果 Q 值

Tab. 3 Detected result of PM2.5

年份	灯光指数	建成区面积	城区人口密度	建成区绿化覆盖率	城镇化率
2006 年	0.253 3	0.224 3	0.188 2	0.147 8	0.249 2
2010 年	0.249 2	0.041 0	0.272 6	0.266 6	0.080 4
2013 年	0.196 6	0.047 7	0.439 5	0.607 1	0.100 1

### 3.5 讨论

本文利用 PM2.5 遥感反演数据、夜间灯光数据以及统计数据，分析了成渝城市群城市化对 PM2.5 浓度变化的影响。从 GWR 回归结果来看，夜间灯光代表的综合城市化水平对 PM2.5 有着显著的影响，在人口密集、高经济水平地区影响程度基本符合环境库兹尼兹曲线，这与 Martfnez Zarzoso 等<sup>[30]</sup>、Zhao 等<sup>[31]</sup>、任春燕等<sup>[32]</sup> 众多学者研究结果类似。从地理探测结果来看，城区

---

人口密度和城市绿化对城区 PM<sub>2.5</sub> 影响越来越显著, 未来应积极推动森林城市建设。国内其他研究比如张淑平等<sup>[1]</sup>采用整个行政区人口密度进行研究, 并未强调城市区域, 而本研究主要是针对城市区域。但由于 2006 年前城区人口以及重庆区县级建成区面积等相关统计数据难以获取, 研究时间段具有局限性。同时, 在城市不同发展阶段空气污染影响因素也不同, 本研究把城市群作为研究对象, 并未根据不同城市规模进行细致分析, 还需进行接下来的深入研究。

## 4 结论

(1) 1998~2013 年成渝城市群城市化速度较快, PM<sub>2.5</sub> 与 DMSPP 夜间灯光影像“峰值区”的呈现出良好的一致性, 且城市区域 PM<sub>2.5</sub> 高于非城市区域。

(2) 成渝城市群 PM<sub>2.5</sub> 重心与夜间灯光重心均出现明显的偏移, 向东南方向偏移。每年 PM<sub>2.5</sub> 重心与夜间灯光重心在经度上波动方向基本相反, 纬度上无明显关系。

(3) 城市化水平较高的地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度较高。1998~2013 年 PM<sub>2.5</sub> 与夜间灯光的 GWR 模型回归结果显示, 夜间灯光数据所代表的城市化水平和人类活动与 PM<sub>2.5</sub> 的分布有着显著的正相关。绝大多数地区 PM<sub>2.5</sub> 的分布受城市化水平和人类活动的影响, 随着城市化水平的增高受到的影响也增大。而在城市群东北区域(除万州外)和西南区域, PM<sub>2.5</sub> 的分布虽然也受城市化和人类活动的影响, 但更多的受到其他因素比如地形或工业化的影响。

(4) 城市化因子解析表明, 2006 到 2013 年灯光指数对 PM<sub>2.5</sub> 的解释力逐渐降低, 而城区人口密度和建成区绿化覆盖率对 PM<sub>2.5</sub> 的解释力逐渐增加, 成为成渝城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化的主要影响因素。

## 参考文献:

[1] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 城市规模对大气污染物 NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5049-5057.

ZHANG S P, HAN L J, ZHOU W Q, et al. Impact of urban population on concentrations of nitrogen dioxide ( NO<sub>2</sub>) and fine particles ( PM<sub>2.5</sub> ) in China [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5049-5057.

[2] VAN D A, MARTIN R V, BRAUER M, et al. Use of Satellite Observations for Long-Term Exposure Assessment of Global Concentrations of Fine Particulate Matter[ J ]. Environmental Health Perspectives, 2015, 123(2) : 135-43.

[3] HAN L, ZHOU W, LI W, et al. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles ( PM<sub>2.5</sub> ) in Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2014, 194C( 1) : 163.

[4] HAN L, ZHOU W, LI W. City as a major source area of fine particulate ( PM<sub>2.5</sub> ) in China [J]. Environmental Pollution, 2015, 206: 183.

[5] PENG J, CHEN S, LV H, et al. Spatiotemporal patterns of remotely sensed PM<sub>2.5</sub> concentration in China from 1999 to 2011 [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 109- 121.

[6] KAUFMAN Y J, TANR^D, BOUCHER O. A satellite view of aerosols in the climate system[ J ]. Nature, 2002, 419(6903): 215-223.

- 
- [7] ELVIDGE C D, CINZANO P, ARVESEN J, et al. The Nightsat mission concept [ J ]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(12) : 2645-2670.
- [8] M. HENDERSON, E. T. YEH, P. GONG, et al. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery [ J ]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24 ( 3 ): 595-609.
- [9] SMALL C, POZZI F, ELVIDGE C D. Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights [ J ]. Remote Sensing of Environment, 2005 , 96(3-4) : 277-291.
- [10] LIU Z F, HE C Y, ZHANG Q F, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008 [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 106: 62-72.
- [11] AMARAL S, CAMARA G, MONTEIRO A M V, et al. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data [ J ]. Computers Environment & Urban Systems, 2005, 29(2) : 179-195.
- [12] HE C Y, SHI P J, LI J G, et al. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/• OLS nighttime light imagery and statistical data [ J ]. Science Bulletin, 2006, 51(13) : 1614-1620.
- [13] DOLL C N H, MULLER J P, MORLEY J G. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery [ J ]. Ecological Economics, 2006, 57( 1) : 75-92.
- [14] 卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 20 世纪 90 年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数 CNLI 方法的探讨 [J]. 地理学报, 2003, (06) : 893-902.
- ZHUO L, SHI P J, CHEN J, et al. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s [ J ]. Acta Geographica Sinica, 2003, (06) : 893-902.
- [15] 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 [J] • 遥感学报, 2003, (03): 168-175, 241.
- CHEN J, ZHUO L, SHI P J, et al. The study on urbanization process in china based on DMSP/OLS Data: development of a light index for urbanization level estimation [ J ]. Journal of Remote Sensing, 2003, (03) : 168-175, 241.
- [16] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区 PM<sub>2.5</sub> 季节污染特征及来源解析 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 2947-2952.
- ZHANG Z S, TAO J, XIE S D, et al. Seasonal variations and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at urban area of Chengdu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33( 11): 2947- 2952.
- [17] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气(10) 及 PM<sub>2.5</sub> 来源解析 [J]. 环境科学研究, 2014, 27 ( 12) : 1387-1394.
- REN L H, ZHOU Z E, ZHAO X Y, et al. Source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in urban areas of Chongqing [ J ]. Research of Environmental Science, 2014, 27( 12) : 1387-1394.

---

[18] 胡艳兴, 潘竟虎, 陈蜒, 等. 基于 ESDA 和 GWR 的中国 地级及以上城市四化协调发展时空分异格局[J]. 经济地 理, 2015, 35(05) : 45-54.

HU Y X, PAN J H, CHEN Y, et al. Spatiotemporal pattern of industrialization, information, urbanization and agricultural modernization of prefecture level cities or above in China based on ESDA and GWR [ J ]. Economic Geography, 2015, 35 (05) : 45-54.

[19] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014 年中国城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, 70 (11) : 1720-1734.

WANG Z B, FANG C L, XU G, et al. Spatial-temporal characteristics of the PM<sub>2.5</sub> in China in 2014[ J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1720-1734.

[20] 贺冉冉, 朱兰保, 周开胜. 基于时间序列模型残差的中国 东部地区空气质量指数(AQI)空间自相关特征分析[J]. 环 境科学学报, 2017, 37(07) : 2459-2467.

HE R R, ZHU L B, ZHOU K S. Spatial autocorrelation analysis of air quality index (AQI) in eastern China based on residuals of time series models[ J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(07) : 2459-2467.

[21] GEARY R C. The Contiguity Ratio and Statistical Mapping[ J]. Incorporated Statistician, 1954, 5(3): 115-146.

[22] WU J, LI J, PENG J, et al. Applying land use regression model to estimate spatial variation of PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China[ J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2015, 22(9) : 7045.

[23] TU J, XIA Z G. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: model design and evaluation [ J]. Science of the Total Environment, 2008, 407( 1) : 358-78.

[24] FOTHERINGHAM A S, BRUNSDON C, CHARLTON M. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships[ M]. International Union of Crystallography, 2002.

[25] SASSI M. OLS and GWR Approaches to agricultural convergence in the EU-15 [ J ]. International Advances in Economic Research, 2010, 16( 1) : 96-108.

[26] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(01) : 116-134.

WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(01) : 116-134.

[27] JU H R, ZHANG Z X, ZUO L J, et al. Driving forces and their interactions of built-up land expansion based on the geographical detector: A case study of Beijing, China[ J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30 ( 11 ) : 2188-2207.

[28] 王少剑, 王洋, 蔺雪芹, 等. 中国县域住宅价格的空间差异特征与影响机制[J]. 地理学报, 2016, 71(8) : 1329- 1342.

WANG S J, WANG Y, LIN X Q, et al. Spatial differentiation patterns and influencing mechanism of housing prices in

---

China: Based on data of 2872 counties [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8) : 1329-1342.

[29] 廖颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境 适宜度评价模型及验证[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18 (6) : 767-778.

LIAO Y, WANG X Y, ZHOU J M. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(6) : 767- 778.

[30] INMACULADA MARTÍNEZ-ZARZOSO, ANTONELLO MA- RUOTTI. The impact of urbanization on CO2 emissions: Evidence from developing countries [ J ] • *Ecological Economics*, 2011, 70(7).

[31] ZHAO S Q, DA L J, TANG Z Y, et al. Ecological consequences of rapid urban expansion: Shanghai, China [ J ]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7).

[32] 任春艳, 吴殿廷, 董锁成, 等. 西北地区城市化与空气质量 变化关系研究 U]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2005(02) : 204-208.

REN C Y, WU D T, DONG S C, et al. A study on the relationship between urbanization and air qualities in the northwest region of china [J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2005 (02) : 204-208.