基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和统计数据的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程重建研究

何春阳 史培军* 李景刚 陈晋 潘耀忠 李京 卓莉 一之瀬俊明

(北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 日本国立环境研究所, 茨城县筑波市小野川 16-2, 筑波市, 〒305-0053, 日本. * 联系人, E-mail: spj@bnu.edu.cn)

摘要 中国大陆目前以行政单元为基础的城镇用地面积统计数据缺乏足够的空间信息, 难以满足大尺度城市化空间格局和变化过程研究的需要. 文中首先提出了一种以现有统计数据为基础, 借助 DMSP/OLS 夜间灯光遥感数据, 快速恢复和提取中国大陆城镇用地空间信息, 弥补现有统计资料不足的新方法. 进而以该方法为基础, 利用 1992、1996 和 1998 年的 3 期 DMSP/OLS 夜间灯光数据, 重建了中国大陆 20 世纪 90 年代的城市化空间过程. 利用统计数据对该方法提取结果的面积总量评估表明, 二者在全中国大陆尺度上的面积相对误差在 1992 年小于 2%, 1996 年和 1998 年则均小于 1%, 在省级尺度, 相对误差最大的省份也没有超过 10%, 大部分省份的相对误差小于 3%. 同时利用高分辨率 Landsat TM 数据对该方法提取结果的城市空间格局特征分析也表明, 利用 DMSP/OLS 提取的城市格局特征与 Landsat TM 提取的城市格局特征基本上是吻合的, 两者的相似程度在 80% 左右. 这说明利用该方法重建的中国大陆 20 世纪 90 年代城市空间过程, 基本上可以反映当时中国大陆城市发展的实际状况, 具有一定的可信性, 可以在一定程度上为中国大陆宏观城市空间格局和变化过程研究提供帮助.

关键词 DMSP/OLS 数据 统计数据 城市化 空间过程

改革开放以来, 中国大陆已经并正在经历快速的城市化过程^[1]. 认识和理解中国大陆城市空间格局特征和变化过程, 调整和优化中国大陆城市化进程中的土地利用格局, 已经被众多的研究者认为是揭示土地利用系统与陆地生态系统之间相互作用机制, 降低和防范中国大陆城市化过程中风险水平的有效途径之一^[2-4]. 但目前的众多研究, 还主要集中在小尺度的城市土地利用分类、空间扩展监测、格局分析和模型模拟等方面, 从宏观尺度对中国大陆整体城市空间格局和变化过程的研究还比较缺乏^[5]. 原因主要在于目前的众多遥感数据, 由于时间和空间分辨率的限制, 还不足以及时有效地提供宏观大尺度的城市空间信息, 使得目前的大尺度研究还主要依赖于以行政单元为基础的缺乏空间信息的社会经济统计数据^[6], 因而难以满足中国大陆宏观城市空间格局和变化过程研究的需要.

美国军事气象卫星 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 搭载的 Operational Linescan System (OLS) 传感器为大尺度的城市研究提供了一种新的数据获取手段. DMSP/OLS 有别于利用地物对太阳光的反射辐射特征进行监测的 LANDSAT、SPOT 和 AVHRR 传感器, 该传感器可在夜间工作, 能够探测

到城市灯光甚至小规模居民地、车流等发出的低强度灯光, 并使之明显区别于黑暗的乡村背景. 其与 AVHRR 相当的空间和时间分辨率, 比较适合大尺度城市化进程的动态监测^[7,8]. 目前, 国外许多学者近年来已成功地将 DMSP/OLS 数据应用于城市问题的相关研究^[9-15].

但由于 DMSP/OLS 数据空间分辨率相对较低, 传感器信号受干扰较大, 原始的灯光数据往往不能直接提供城市空间格局信息. 如何直接利用 DMSP/OLS 快速提取城市空间格局信息, 满足大尺度城市空间格局和变化过程研究的需要, 一直是当前众多研究者关注的焦点问题^[10]. 目前国内外利用 DMSP/OLS 数据直接提取城市空间格局信息的基本方法主要有以下 3 类:

() 经验阈值法. 即根据 DMSP/OLS 数据特征和相关背景知识, 人为设定阈值, 认为灯光强度超过一定阈值的像元就是城市像元. 该方法简单易行, 但主观性较强, 常见于 DMSP/OLS 数据的早期应用中^[18,9].

() 突变检测方法. Imhoff 认为, 在一段时间的连续观测中, 地表灯光被探测到的频率越高, 属于城

市类型的概率越大,同时提取的城市应该保持市中心的完整性^[10].因此,可以通过逐渐增加阈值来减小噪声并得到中心相对完整的城市斑块.在灯光图像中,当阈值逐渐增加时,城市多边形(斑块)逐渐收缩,当阈值增加到某一个点时,明亮的城市多边形不再沿着边缘变小,而是开始在内部出现破碎,即开始在明亮的多边形内部出现黑暗的小岛,此时城市多边形的周长会突然增加.他认为使城市多边形周长突然增加的阈值点就为划分城市的最佳阈值点^[10].利用该方法,Imhoff在1997年提取了美国的城市空间格局信息.但该方法的最大局限在于忽略了城市发展的区域性差异特征,方法的通用性还没有得到充分证实^[10].

() 基于辅助资料的空间比较法.基本思路是利用相关辅助数据,来帮助确定最佳阈值,进而从DMSP/OLS数据中提取城市空间信息.如Milesi等人在研究城市扩展对植被初级净生产力影响时,分别以美国国家土地覆盖数据集和美国人口普查数据为参考,采用线性回归的方法,选取t检验效果最好的阈值作为提取城市的最佳阈值^[16].Henderson等人以较高分辨率的Landsat TM数据提取的城市格局为基础,从DMSP/OLS的稳定灯光图像和辐射标定灯光图像两种数据产品中提取了较为准确的美国旧金山、中国北京和拉萨3个城市的空间信息^[17].目前这类基于辅助资料的空间比较法应用相对比较广泛,但辅助资料的可靠性和成本因素将是该类方法应该考虑的重要问题.例如Henderson等人的方法,尽管具有一定的可靠性,但大范围较高分辨率的Landsat TM获取的困难性在一定程度上限制了其应用的广泛性^[17].

在中国,尽管国土资源部几乎每年发布一次城镇用地的面积统计数据.但这些依赖于行政单元的统计数据由于缺乏空间信息,往往难以满足大尺度的中国城市空间格局研究的需要^[6].如果能在这些城镇用地统计数据的基础上,利用DMSP/OLS灯光数据快速方便地提取和恢复城市空间信息,无疑将极大促进当前我国城市化空间过程的研究.鉴于此,本文将首先提出一种以现有统计资料为基础的,利用DMSP/OLS夜间灯光遥感数据,快速恢复和提取中国大陆城镇用地空间信息,弥补现有统计资料空间信息

不足的新方法.进而以该方法为基础,利用1992、1996和1998年的三期DMSP/OLS夜间灯光数据,获取了1992、1996和1998年的中国大陆城市空间格局信息,重建了中国大陆20世纪90年代的城市化空间过程.这将为当前从大尺度上认识和理解中国大陆城市化空间过程提供支持和帮助.

1 数据

() 遥感数据.主要来自于日本国立环境研究所提供的非辐射定标的夜间平均灯光强度数据产品,空间分辨率为1 km.该数据产品是由日本国立环境研究所和东京大学借鉴1996~1997年间夜间灯光数据辐射标定实验工作的经验,针对亚洲地区的特点开发的.该产品是消除云及火光等偶然噪声影响后对多时相VNIR通道灰度值进行直接平均化处理得到的,包括1992、1996和1998年的数据产品,主要利用1992年(DMSP F10卫星)、1996和1998年(DMSP F12卫星)各年度9~11月月光照度在50%以下的多时相OLS数据制成.与1996~1997年的辐射定标夜间灯光强度数据的获取方法相比,该数据不对放大增益进行人为控制,因而可以充分利用现有数据储备进行多年度时间序列制图,为研究宏观尺度的城市化空间过程提供了条件^[7].

() 统计数据.所用的城镇用地面积数据主要来源于中国自然资源数据库¹⁾、刘育成(2000)主编的《中国土地资源调查数据集》和国土资源部2000年发布的《中国国土资源年鉴》.

2 方法

由于非辐射定标的夜间平均灯光强度数据产品中,灯光强度(图像灰度值)越高的地方,是城镇用地的可能性越大^[7].因此,在现有研究的基础上,我们主要依据下面的两个基本假设来提取中国大陆城市空间信息:

基本假设1:中国大陆现有的城镇用地面积统计数据可以基本反映中国大陆各省区城镇用地的总量特征,因此利用DMSP/OLS数据提取的各省区城镇用地的面积总量应该充分接近各省区的现有统计数据.

基本假设2:在DMSP/OLS遥感数据1 km空间分辨率的研究尺度下,中国大陆20世纪90年代的城镇用

1) <http://159.226.111.50/index.asp>

地基本上是连续增加的. 因此, 在前一个时期 DMSP/OLS 图像上出现的城市斑块, 不会在后一个时期的 DMSP/OLS 图像上消失, 应该首先在后一个时期的图像上得到保留.

基本思路是在 DMSP/OLS 图像中, 采用二分法的思路, 快速设定各省区的不同阈值, 提取各省区的城镇用地空间格局特征和面积总量信息, 并将提取结果与各省区城镇用地面积的统计数据进行比较, 直到某一阈值条件下利用 DMSP 提取的各省区城镇用地面积总量与统计数据充分接近为止. 具体的, 该方法包括下面几个主要步骤:

() 在完成灯光数据相关预处理后, 首先在 GIS 支持下, 提取各省区 1992, 1996, 1998 年的 3 期 DMSP/OLS 非辐射定标的夜间平均灯光强度数据.

() 设定各省区潜在城市阈值并计算该阈值下的城镇用地面积. 具体的, 设 1992 年某一省区灯光图像最大灰度值、最小灰度值分别为 $DN_{\max}$ 和 $DN_{\min}$, 该省区基于统计资料的同期城镇用地总量为 US , 则该省灯光图像的潜在阈值 DN_T 首先设定为

$$DN_T = \text{int}[(DN_{\max} - DN_{\min}) / 2] \quad (1)$$

在该阈值 DN_T 下, 灯光图像中提取的城镇用地面积 $DMSP_{\text{area}}$ 为

$$DMSP_{\text{area}} = \sum_{DN_i = DN_T}^{DN_{\max}} f(DN_i) \quad (2)$$

式中, DN_i 表示介于 DN_T 和 $DN_{\max}$ 之间的某一灰度值,

$f(DN_i)$ 表示灰度为 DN_i 的该省区内的城镇像元的总面积.

() 比较潜在阈值下的城市面积总量 $DMSP_{\text{area}}$ 与该省区基于统计资料的同期城镇用地总量 US 之间的差异, 重新设定新的阈值, 直到 $DMSP_{\text{area}}$ 与 US 充分接近为止. 具体的, DN_T 下 $DMSP_{\text{area}}$ 与 US 的差值 $\text{Error}(DN_T)$ 为:

$$\text{Error}(DN_T) = DMSP_{\text{area}} - US, \quad (3)$$

如果 $\text{Error} > 0$, 则 $DN_{\min} = DN_T$, 如果 $\text{Error} < 0$, 则 $DN_{\max} = DN_T$. 然后转到(1)式, 重新设定新的阈值, 并按照(2)和(3)式重复计算比较, 直到满足(4)式为止. 此时的阈值 DN_T 就是使提取的城镇用地面积总量与同期统计数据充分接近的该省区的最佳城镇用地提取阈值.

$$|\text{Error}(DN_T - 1)| \quad |\text{Error}(DN_T)| \quad |\text{Error}(DN_T + 1)|, \quad (4)$$

上式中, $\text{Error}(DN_T)$, $\text{Error}(DN_T - 1)$, $\text{Error}(DN_T + 1)$ 分别表示在阈值 DN_T 及其邻域(取一个单位步长)条件下, 依据(2)和(3)式计算得到的 $DMSP_{\text{area}}$ 与 US 的差值.

() 在得到 1992 年各省区的城镇用地后, 在 GIS 支持下, 我们首先得到了基于灯光数据的 1992 年的中国大陆城镇用地信息. 然后进一步依据假设 2, 采用同样的方法, 得到了 1996 和 1998 年的中国大陆城镇用地信息. 最后在此基础上, 重建了 20 世纪 90 年代的中国大陆城市空间过程(图 1).

图 1 基于 DMSP/OLS 数据的 20 世纪 90 年代中国大陆城市化空间过程

表 1 利用统计数据对灯光数据提取结果的精度评价

省份	1992 年			1996 年			1998 年		
	提取/km ²	统计/km ²	相对误差 /%	提取/km ²	统计/km ²	相对误差 /%	提取/km ²	统计/km ²	相对误差 /%
北京	1647	1625.47	1.325	2173	2203.81	-0.157	2249	2249.38	-0.017
天津	1970	1931.53	1.992	2180	2183.43	-0.514	2233	2236.25	-0.145
河北	12175	13099.87	-7.060	14000	14072.40	0.380	14342	14361.39	-0.135
山西	6483	6590.00	-1.624	6987	6960.52	0.549	7213	7205.14	0.109
内蒙古	7991	8224.27	-2.836	11751	11686.81	0.695	11751	11442.54	2.696
辽宁	9277	10121.73	-8.346	10805	10730.44	0.281	10910	10912.37	-0.022
吉林	8176	8038.93	1.705	8176	8153.12	-0.123	8190	8192.59	-0.032
黑龙江	10775	11017.22	-2.199	11219	11232.84	-0.506	11361	11358.61	0.021
上海	1410	1428.87	-1.320	1921	1930.77	0.998	2058	2057.91	0.004
江苏	10908	11672.67	-6.551	13098	12968.57	0.228	13503	13498.55	0.033
浙江	4138	4177.13	-0.937	5586	5573.30	-0.172	5740	5748.77	-0.153
安徽	11632	11867.33	-1.983	12608	12629.71	-0.203	12706	12728.52	-0.177
福建	2926	3041.07	-3.784	3924	3931.98	-0.016	4188	4207.23	-0.457
江西	5887	5417.93	8.658	5904	5904.94	-1.429	5997	5999.07	-0.034
山东	16143	17102.87	-5.612	18006	18267.10	0.819	18580	18628.22	-0.259
河南	16312	17662.13	-7.644	18492	18341.71	-0.763	18545	18538.29	0.036
湖北	8828	9341.60	-5.498	9390	9462.19	-3.233	9561	9570.24	-0.097
湖南	8658	8517.60	1.648	9783	10109.81	-0.583	10220	10218.79	0.012
广东	9219	9333.13	-1.223	11375	11441.74	3.029	12197	12263.50	-0.542
广西	6400	5914.34	8.212	6400	6211.86	3.408	6419	6406.01	0.203
海南	1339	1452.00	-7.782	2205	2132.34	0.803	2205	2165.34	1.832
四川 ^{a)}	14624	13871.73	5.423	16809	16675.14	2.345	17259	17231.73	0.158
贵州	3332	3029.47	9.986	4273	4175.11	-0.950	4273	4263.70	0.218
云南	4762	4794.93	-0.687	5392	5443.74	0.112	5603	5598.81	0.075
西藏	356	340.07	4.685	363	362.60	-0.067	367	367.27	-0.073
陕西	6551	6246.93	4.867	6755	6759.50	0.437	6834	6829.08	0.072
甘肃	7936	8309.07	-4.490	8648	8610.36	-6.949	8687	8685.13	0.022
青海	1222	1167.27	4.689	2138	2297.66	0.712	2330	2316.30	0.591
宁夏	1103	1168.93	-5.640	1631	1619.47	0.427	1634	1635.53	-0.093
新疆	5562	5383.53	3.315	8717	8679.91	-0.018	8815	8828.10	-0.148
总计	207742	211889.62	-1.957	240709	240752.86	-0.001	245970	245744.34	0.092

a) 为了保持数据的可比性, 重庆市被并入四川省内

3 结果分析

首先利用现有统计数据对灯光数据提取的中国大陆 1992, 1996 和 1998 的城镇用地总量进行精度评价. 从表 1 可见, 在全中国大陆尺度, 二者的总体相对误差在 1992 年小于 2%, 1996 和 1998 年则均小于 1%, 在省级尺度, 相对误差最大的省份也没有超过 10%, 大部分省份的相对误差小于 3%. 由此可见, 利用本文方法由灯光图像提取的城镇用地信息, 首先在总量上是与统计数据非常接近的. 考虑到 DMSP/OLS 图像的空间分辨率和灰度特征, 我们认为这种面积总量上的差异还是基本上可以接受的.

参考Henderson等人的工作^[17], 我们进一步利用现有的较高分辨率的Landsat TM数据来评价DMSP/OLS

数据提取结果的空间格局特征. 由于 Landsat TM 数据空间分辨率是 30 m, 远大于 DMSP/OLS 数据的 1 km, 我们认为这种评价是基本可行和可靠的. 具体的, 由于资料和成本的限制, 我们主要选用了北京城区 1992, 1996 和 1998 年的 3 期 TM 数据, 在几何纠正等相关预处理后, 首先提取了北京城市 1992, 1996 和 1998 年的城市空间格局信息, 然后将其与 DMSP/OLS 数据提取的该区域城市空间格局特征进行比较(图 2, 表 2). 从中可见, DMSP/OLS 提取的城市格局特征与 TM 提取城市格局特征基本上是吻合的, 两者的相似程度在 80%左右. 可见, 本文利用灯光图像重建的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程, 基本上可以反映当时中国大陆城市发展的实际状况.

图 2 利用较高分辨率 Landsat TM 数据对灯光数据城镇用地提取结果的评价

表 2 利用高分辨率 Landsat TM 数据对灯光数据结果的精度评价结果

TM 数据提取结果/灯光数据提取结果		城镇用地比例/%	非城镇用地比例/%	总和/%
1992 年	城镇用地比例/%	12.83	5.82	18.65
	非城镇用地比例/%	11.32	70.03	81.35
	总和/%	24.15	75.85	100.00
	总精度 82.86			
1996 年	城镇用地比例/%	18.56	5.39	23.95
	非城镇用地比例/%	13.27	62.78	76.05
	总和/%	31.83	68.17	100.00
	总精度 81.34			
1998 年	城镇用地比例/%	19.74	7.04	26.78
	非城镇用地比例/%	13.45	59.77	73.22
	总和/%	33.19	66.81	100.00
	总精度 79.51			

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/972004-300>

4 结论和讨论

() 当前中国大陆以行政单元为基础的城镇用地面积统计数据缺乏足够的空间信息, 难以满足大尺度城市化空间格局和变化过程研究的需要. 本文提出了一种以现有统计数据为基础, 借助 DMSP/OLS 灯光数据, 快速提取中国大陆城镇用地空间信息的新方法. 该方法的基本思路是在 DMSP/OLS 图像中, 采用二分法的思路, 快速设定各省区的不同阈值, 提取各省区的城镇用地空间格局特征和面积总量信息, 并将提取结果与各省区统计的城镇用地面积进行比较, 直到 DMSP 提取的各省区城镇用地面积总量与同期统计数据充分接近为止.

() 利用该方法, 我们提取了 1992、1996 和 1998 年的中国大陆城市空间格局信息, 重建了中国大陆 20 世纪 90 年代的城市化空间过程. 利用统计数据对该方法提取结果的面积总量评价表明, 二者在全中国大陆尺度上的面积相对误差在 1992 年小于 2%, 1996 年和 1998 年则均小于 1%, 在省级尺度, 相对误差最大的省份也没有超过 10%, 大部分省份的相对误差小于 3%. 同时利用 Landsat TM 数据对该方法提取结果的空间格局特征分析也表明, 从 DMSP/OLS 提取的城市格局特征与 Landsat TM 提取的城市格局特征基本上是吻合的, 两者的相似程度在 80% 左右. 由此可见利用该方法重建的中国大陆 20 世纪 90 年代城市空间信息, 基本上可以反映当时中国大陆城市发展的实际状况, 具有一定的可信性.

() 当然本文方法提取的城市空间信息的准确性首先取决于统计资料的准确性和可靠性. 同时, 目前所用的统计资料, 还局限于省级尺度, 对每个省设定一个阈值虽然在全中国大陆尺度上具有一定的实际意义, 但在每个省份内部, 显然是存在一定误差的. 此外, 由于资料 and 成本的限制, 我们目前对该方法生成结果的空间格局评价仅仅使用了北京地区的 Landsat TM 数据, 显然也是比较薄弱的. 如果利用更多地区的高分辨率数据来进行空间格局的精度评价, 所得结果应该更具有说服力. 不过需要指出的是, 本文所述方法既能在一定程度上弥补现有统计资料空间信息不足的缺陷, 而且在数据成本上也 Landsat 等高分辨率遥感数据低廉, 是一种利用遥感信息快速从统计数据中恢复空间信息的有益尝试, 这将对当前我国大尺度的城市化空间格局和过程研究提供积极的支持和幫助. 此外, DMSP/OLS 灯光数据在区域城市

化过程研究中表现出的巨大潜力, 也应该在目前中国的城市研究中给予足够重视.

致谢 对评审专家提出的宝贵意见, 在此深表感谢. 本工作受国家自然科学基金杰出青年基金(批准号: 40425008)资助.

参 考 文 献

- 1 顾朝林, 徐海贤. 改革开放二十年来中国大陆城市地理学研究进展. 地理科学, 1999, 19(4): 320-331
- 2 周一星, 张莉. 改革开放条件下的中国大陆城市经济区. 地理学报, 2003, 58(2): 271-284
- 3 吕安民, 李成名, 林宗坚, 等. 中国大陆省级人口增长率及其空间关联分析. 地理学报, 2002, 57(2): 143-150
- 4 薛东前, 王传胜. 城市群演化的空间过程及土地利用优化配置. 地理科学进展, 21(2): 95-102
- 5 姚士谋, 朱英明, 陈振光. 中国大陆的城市群. 合肥: 中国大陸科学技术大学, 2001
- 6 周一星. 关于明确中国大陆城镇概念和城镇人口统计口径的概念. 城市规划, 1996, (3): 10-15
- 7 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国大陆城市化过程研究——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
- 8 卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 20 世纪 90 年代中国大陆城市时空变化特征——基于灯光指数 CNLI 方法的探讨. 地理学报, 2003, 58(6): 893-902
- 9 Sutton P. Modeling Population Density with Nighttime Satellite Imagery and GIS. Computers Environment and Urban Systems, 1997, 21(3-4): 227-244[DOI]
- 10 Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C, et al. A Technique for Using Composite DMSP/OLS 'City Lights' Satellite Data to Accurately Map Urban Areas. Remote Sensing of Environment, 1997, 61: 261-370
- 11 Imhoff M L, Lawrence W T, Elvidge C, et al. Prevalsky and Brown, Using Nighttime DMSP/OLS Images of City Lights to Estimate the Impact of Urban Land Use on Soil Resources in the US. Remote Sensing of Environment, 1997, 59: 105-117[DOI]
- 12 Imhoff M L, Bounoua L, Defries R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 434-443[DOI]
- 13 Gallo K P, Tarpley J D, McNab A L, et al. Assessment of urban heat islands: a satellite perspective. Atmospheric Research, 1995, 37: 37-43[DOI]
- 14 Elvidge C D, Baugh K E, Hobson V H, et al. Satellite Inventory of Human Settlements Using Nocturnal Radiation Emission: A Contribution for the Global Toolchest. Global Change Biol, 1997, 3: 387-791[DOI]
- 15 Lo C P. Modeling the Population of China Using DMSP Operational Linescan System Nighttime Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67: 1037-1047
- 16 Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, et al. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 401-410[DOI]
- 17 Henderson M, Yeh E T, Gong P, et al. BAUGH. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery. Int J Remote Sensing, 2003, 24(3): 595-609[DOI]

(2005-09-09 收稿, 2005-10-13 接受)