

西安城市扩张及其驱动力分析

吴宏安¹, 蒋建军¹, 周 杰², 张海龙¹, 张 丽¹, 艾 莉²

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097;

2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

摘要: 随着人口的增长与经济的发展和, 尤其我国西部城市在西部大开发的背景下, 大中城市的扩张十分明显, 深刻地影响城市周边的生态环境。如何快速准确地获取城市扩张信息, 并分析其驱动力机制, 对于指导城市规划, 优化西部生态环境与可持续发展都具有十分重要的意义。作者分别采用了监督分类法和归一化裸露指数 (NDBI) 法提取了西安市的城市边界信息, 并对二者进行对比分析, 认为监督分类法提取的城市边界信息较为准确。在此基础上通过对相关统计资料的分析, 认为西安市城区快速扩张与西部大开发以来西安市固定资产投资额的大幅增加以及经济的快速发展有密切的关系, 此外人口的增加、交通等基础设施的发展也是重要的驱动因素。

关键词: 城市扩张; 监督分类法; NDBI; 驱动力机制; 西安市

1 引言

西部大开发以来, 我国西部的城市化进程加快, 特别是大中城市的扩张, 对其周边地区的农耕地侵占加剧, 已深刻地影响着城市的周边环境。如何有效地获取城市边界信息, 动态监测城市扩张过程, 分析城市扩张的驱动力机制, 对科学合理地指导城市规划、控制城市用地规模, 保护有限的耕地资源和生态环境具有十分重要的意义。

利用不同时相的卫星遥感影像数据通过数字图像处理方法获取城区信息, 从而揭示城市扩张动态变化是监测城市扩张的有效方法之一, 与传统的政府部门统计数据相比更具有实时、可靠性。自 20 世纪 70 年代美国的地球资源卫星发射以来, 国内外学者在城市及城乡结合部的研究进行了许多有益的尝试。在国际上许多学者对城市及郊区的土地利用变化方面做了大量的工作, 如 R Welch 通过对 TM 的假彩色合成图像目视解译提取了城市的建成区面积, 进一步分析了建成区面积与人口之间的关系^[1]。Bany Haack 等利用 Landsat MSS 和 TM 数据对城市与城市郊区的土地覆盖进行分类, 通过二者结果的比较认为对土地覆盖较均一的城郊分类 TM 较 MSS 要好, 但对土地覆盖复杂的地域分类则比 MSS 差^[2]。Cunan & Pedley 利用 Landsat MSS 数据对英格兰地区城市边缘地带进行了土地利用分类^[3], Harris & Ventura 对美国威斯康星州的 Beaver Dam 的城市边缘地带也进行土地利用分类^[4], Gao & Skillcom 利用了 SPOT 影像对澳克兰南部的城乡结合带做了详尽的土地利用分类^[5], 通过对城乡结合部土地利用的分类, 揭示城市对城郊土地利用的影响。我国在城市区域的研究方面也取得了较多的成果, 如杨存建和周成虎用谱间结构阈

收稿日期: 2004-07-05; 修订日期: 2004-11-09

基金项目: 欧盟资助项目 (ICA4-CT-2002-10004); 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX3-SW -146) [Foundation: Sustainable Agroecosystem Management and Development of Rural-Urban Interaction in Regions and Cities of China (SUSDEV-CHINA), No.ICA4-CT-2002-10004; Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences, No.KZCX3-SW -146]

作者简介: 吴宏安 (1981-), 男, 安徽枞阳人, 硕士研究生, 主要从事遥感与 GIS 的有关研究工作。

E-mail: wha_105@ sina.com

值法从 TM 影像上半自动的提取居民地信息^[6]；查勇等利用归一化建筑指数对无锡市的城镇用地进行了提取^[7]，这些研究在城市边界提取方法上进行了有益的探索。但是，在有效获取城市边界，并结合城市边界的变化关系，进一步分析城市扩张驱动力方面，国内外的研究还不是很^[8-10]，需要作进一步深入的探讨。

西安市是我国西部重要的城市之一，近几年来城市扩张十分迅速。本文拟采用监督分类法和归一化裸露指数 (NDBI) 法两种方法提取西安市 2000 和 2003 年两个时相的城市边界信息，在此基础上比较这两种方法的结果差异，并结合相关的统计资料对西安市城市扩张的驱动力机制进行剖析。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

西安市地处我国西北东部关中平原中部，位于东经 107°41′~109°49′和北纬 33°39′~34°44′之间。地势东南高西北低，南依秦岭，土地总面积 9983 km²，属温带大陆性气候，平均海拔高度 424 m 左右，多年平均气温 13.0℃，多年平均降水量 604.2 mm，境内河流众多交错，发育于秦岭。近年来随着人口的增长、经济发展、西部大开发战略的实施以及投资环境的不断改善，西安市城区扩展迅速加剧，对周边郊区的生态环境已产生了深刻的影响。

2.2 数据来源

本文选用的材料为美国陆地卫星数据，成像时间分别为 2000 年 4 月 26 日的 Landsat 7 ETM+ 和 2003 年 5 月 29 日的 Landsat 5 TM 影像(图 2a, 3a)，轨道号为 127/36，其分辨率为 30 m。此外还有西安地区 30 m 分辨率的数字高程模型 (DEM)，以及西安市的有关统计资料。

2.3 方法

本文研究的总体思路是依据美国 Landsat ETM+ /TM 数据获得不同时期城区边界，并结合相关的统计资料对城市扩张的驱动力进行分析(图 1)。其方法步骤如下：

(1) 遥感图像的预处理 为了有效获取城市扩张边界，首先需要对 Landsat 7 ETM+ 和 Landsat 5 TM 数据进行预处理，预处理包括大气校正、几何纠正和正射校正。大气校正的目的是获得地表准确的反射率特征，在此基础上从 1:5 万地形图上获得地面控制点对 2 景数据进行几何校正，为了进一步减少地形对太阳辐射的影响，采用 DEM 对遥感图像进行正射校正。

(2) 城市边界的提取 城市边界的获得采用监督分类与归一化裸露指数法 (Normalized Difference Barren Index, NDBI) 两种方法进行提取，并对结果进行分析比较，确

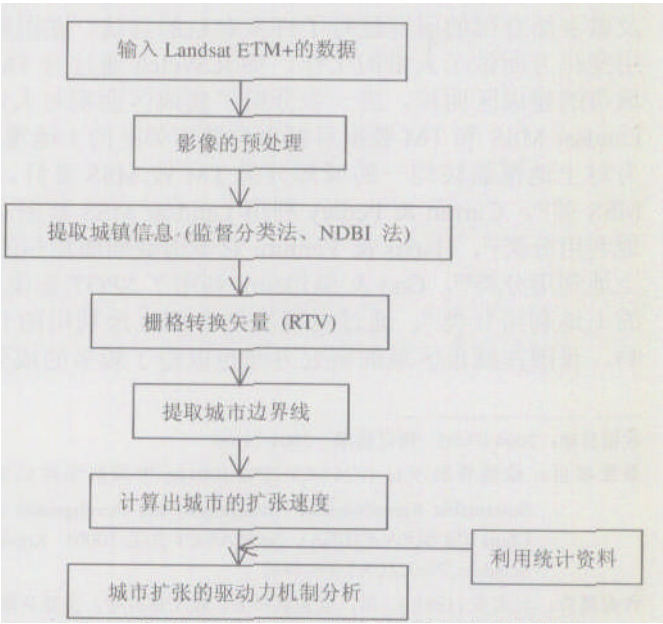


图 1 城市扩张及其驱动力机制分析的技术流程图

Fig. 1 The flow chart of analyzing driving force of urban expansion

定精度较高的作为城区的边界。

(3) 城市扩张驱动力分析 利用西安市近几年的统计资料,结合城市发展的基本规律,探索近年来促使西安市扩张的主要驱动力因素。

3 西安市城市边界信息的提取

3.1 监督分类法

监督分类法是获取土地利用信息最常用的方法。影像经预处理后,根据不同地表覆盖的影像光谱特征,选择训练样区,与以往土地利用/土地覆盖分类不同的是本文对影像只分城区类和非城区两类,这样有利于分清城镇地域,消除多类别的干扰。然后选用最大似然法进行分类(图 2b、3b)。根据 PCI 提供的分类报告可以看出,2000 年和 2003 年的影像分类的总体精度 (Overall accuracy) 分别达到 98.96%、96.80%, 偏相关系数 (KAPPA COEFFICIENT) 分别为 0.98959、0.96812。

从分类图可以看出,由于城区绿地、水域等的影响使得分类得到的城区夹有非城区的类别,同时为了便于栅格转换成矢量,对分类图做了 5 pixel*5 pixel 的滤波,进行整体化合并,最后进行类的合并,将城市内部的非城镇类归并到城镇类,而将城市外围的城镇类全部归并为非城镇类,这样西安市的城市轮廓就很清晰的展示出来了,此基础之上,提取出了 2000 年、2003 年西安市的城市边界线(图 2c、3c)。

3.2 归一化裸露指数法 (NDBI)

为确保城区边界信息的真实性,本文又采用了归一化裸露指数 (NDBI) 对 2000 年的影像进行了西安市的边界提取。NDBI 是类似于归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 的反映地表裸露特征的一个指数,它是 NDVI 的一个应用。除了 NDBI,还有归一化水体指数 NDWI (Normalized Difference Water Index) 和归一化冰雪指数 NDSI (Normalized Difference Snow Index) 用来提取水体信息和冰雪信息^[12-15]。从地物的波谱特性来看,ETM/TM 4 (0.76~0.90 μm) 是近红外波段主要反映的是植被信息,因此对于监测植被具有较高的敏感性,对裸露区或居民地来说反射率较低;ETM/TM 5 (1.55~1.75 μm) 属短波红外波段,反映的是地物水分含量信息,含水量高的如森林、农田反射率低,对于含水量低的如居民地、裸露地等则反射率高。诸多研究表明^[7,11],在 Landsat TM/ETM+ 影像中,波段 4 和波段 5 相比,除了城镇类的亮度值较高外,其他类(裸露地除外)的亮度值都较小。因此归一化裸露指数 (NDBI) 就是对影像做 $(\text{band}5 - \text{band}4) / (\text{band}5 + \text{band}4)$ 运算所得到的值(图 4a)。此前,查勇^[7]曾认为此指数反映的是城镇信息,故称其为归一化建筑指数,但笔者认为这一指数从本质上来讲揭示了地表的裸露特征,因此将它定义为归一化裸露指数 (NDBI)。

西安市的 NDBI 的数值范围为 -0.435185 到 0.160142,经过反复多次试验,发现以 -0.1 为阈值,对图像做二值化处理后可以达到比较好的效果。即把数值为 -0.435185 ~ -0.1 赋为蓝色,将数值为 -0.1~0.160142 赋为绿色(图 4b)。进而对二值化图做掩模处理,提取了西安市城区,并将其转换为矢量提取城市边界线(图 4c)。

3.3 结果分析

对比二种提取城市边界方法,可以看出它们各有优缺点。比较图 2、3 的 (a) 和 (b),不难发现监督分类法,虽然有很高的精度,其总体精度达到 98.96%,但根据目视判读,仍有一些小的城镇不能分出来。不过它能够将大的城镇很好地提取出来,如西安、咸阳等,对于本文的研究目的而言,是比较理想的一种方法。如果要提取所有的城镇的话,显然这种方法还有待改进,特别是在训练样本的选取方面还要仔细考虑,否则会漏掉一些比较小的城镇。

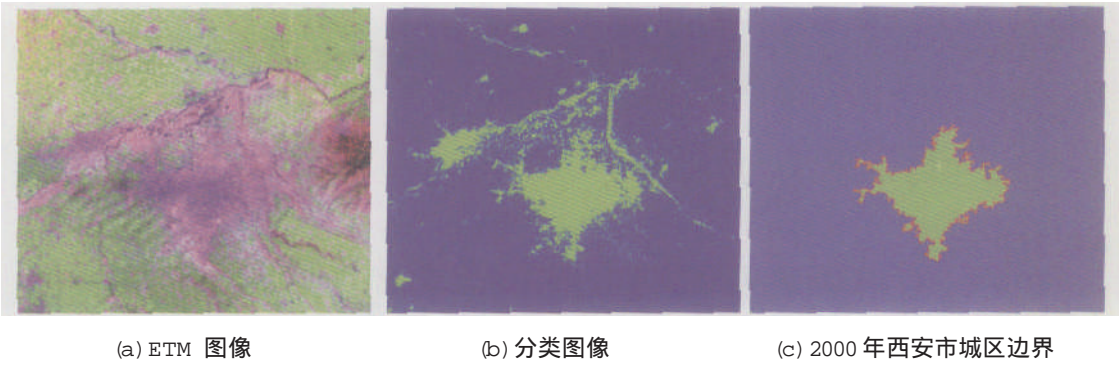


图 2 基于监督分类图获取的 2000 年西安市边界图

Fig. 2 Urban boundary of Xi'an in 2000 with supervised classification based on Landsat ETM

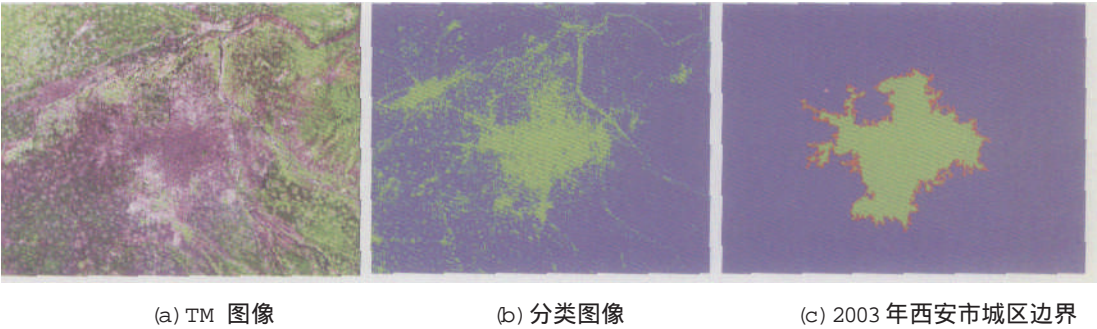


图 3 基于监督分类方法获取的 2003 年西安市边界图

Fig. 3 Urban boundary of Xi'an in 2003 with supervised classification based on Landsat TM

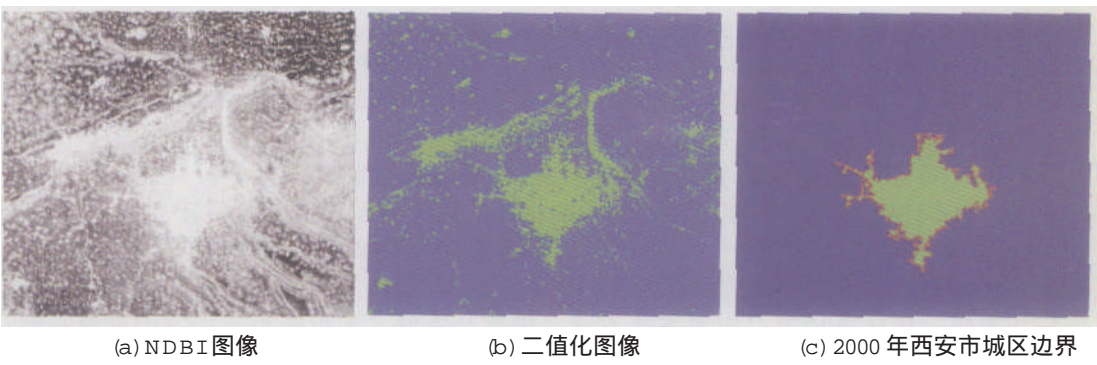


图 4 基于 NDBI 值获得的 2000 年西安市边界图

Fig. 4 Urban boundary of Xi'an in 2000 derived from NDBI

就 NDBI 法而言，这一方法能够将城镇信息提取出来，但从西安市 2000 年的城市边界比较不难发现（图 2、4），依据 NDBI 方法获得的城区信息中，也包含了一些裸露区，即使经过了二值化处理也难以去除，从而产生了城区数据偏大。对二值化的城区边界结果沿周边随机取得 80 个样点进行精度分析，得到精度混淆矩阵（表 1）。

由表 1 可见，从随机取得的 80 个精度检验点来看，城区与非城区的精度分别为 66.67% 和 82.28%，平均精度 78.75%。通过提取的城区边界与实际进行对比发现，其城区边界包括了城区周

表 1 基于二值化图所得的混淆矩阵

Tab. 1 Confusion matrix based on binary results

	城镇	非城镇	合计	精度 (%)
城镇	6	3	9	66.67
非城镇	14	57	71	82.28
合计	20	60	80	

边的一些裸地，夸大了城区面积。

综上所述，监督分类法和 NDBI 法提取城镇信息方面各有优势，就本研究区而言，选择二类监督分类法的结果比较合理，且检验精度远高于 NDBI 法。因此认为采用监督分类法所得到的城市边界是可信的，并以此对城市扩张驱动力做进一步分析。

4 城市扩张及驱动力分析

4.1 城市扩张及其特点

从监督分类法获得的西安市城区 2000~2003 年边界结果分析，发现 2000~2003 年的 3 年内，西安市的城市扩张十分迅速，2000 年西安市的城区面积（本文所指的城区比建成区要大）约为 253.37 km^2 ，而 2003 年其面积则达 358.60 km^2 ，净增 105.23 km^2 ，年增长率达 12.3%。对比图 2c 与图 3c 分析，可以看出城市扩张主要集中在北部的未央区和南部的雁塔区和长安区，其中尤以西南方向突出，东、西部则变化不大。西安市北部的未央区和南部的雁塔区、长安区分别是高新技术开发区和经济技术开发区。开发区的大规模建设及其带来的一系列基础设施的配套建设、集聚效应使得城市化进程加快。

4.2 城市扩张驱动力分析

考察西安市近年来在西部大开发战略的推动下城市发展的综合因素，结合近 10 年的社会经济统计资料，认为西安市扩张的驱动力主要包括以下 4 方面：

4.2.1 经济快速增长 西安市自 2000 年以来国民经济得到了长足的发展，3 来，国内生产总值（GDP）从 643.26 亿元增加到 940.40 亿元（数据来源：2001 年以前数据来自《2002 西安市统计年鉴》，2001 年以后的数据来自西安市人大网站，下同），年增长率在 13% 以上，高于全国及陕西省平均水平（图 5）。经济建设的飞速发展引起了国民经济中的各种生产要素组合而成的生产函数向更高层次变革。城镇化引起的这种变革突出表现在产值结构和就业结构向第二产业和第三产业迅速发展，城市第一经济效率即城市人均国民生产总值的不断增长等方面^[10]。2000 年以来西安市的第一产业在全市的 GDP 中的比重逐渐减小，而第二产和第三产的比重逐年增加（图 5）。城市用地效益也有所提高，从 2000 年的 2.53 亿元 km^2 提高到 2003 年的 2.63 亿元 km^2 。

由于发展经济的需要，西安市有两个规模较大的开发区即经济技术开发区和高新技术开发区，分别位于主城的北面 and 南面。开发区的建立导致了城市的扩张，使城市向开发区发展并与其连接，这样城市的面积得到了增加。其实开发区的建立不只是区内的土地得以开发，成为城市的一部分，而且它的连锁反应带动了基础设施建设、房地产业、商业、餐饮、娱乐等服务业快速发展，使得开发区的周边地区也得到了迅速开发，所以这两个方向的城市扩张十分突出，成为西安市城市用地面积增加的主体。

4.2.2 投资额大幅增加 西部大开发以来，由于各种资金包括民营资本

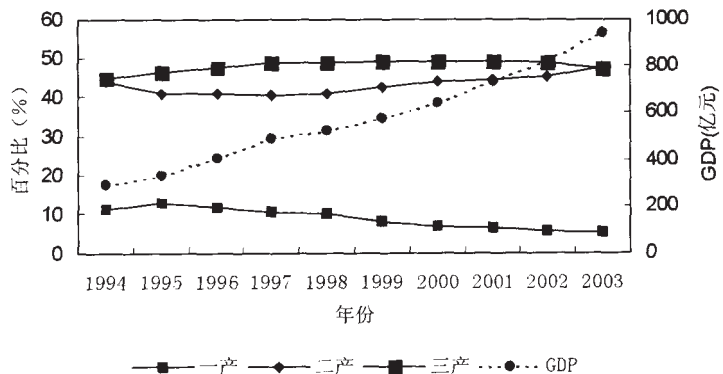


图 5 1994~2003 年西安市的 GDP 及 3 大产业在其中的比重变化图

Fig. 5 Change of GDP in Xi'an and proportion of different industries in GDP (1994-2003)

和外资的流入,西安市的总投资额增长率十分迅猛,图 6 所示的是近十年来西安市的全社会固定资产投资额情况,可以看出其 2000 年到 2003 年三年中,全社会固定资产投资额的平均年增长率超过 25%,特别是 2003 年达到了 41.7%,固定资产投资额的多少直接影响城市的经济发展,快速的固定资产投资额增长率使得西安市近几年的发展速度异常加快,特别是两大开发区及其周边地带。从而导致城市用地的大幅增加。

4.2.3 城市人口快速增加 2000~2003 年以来,西安市的人口逐年增加,特别是由于经济的快速发展导致了大量流动人口的增加,同时随着人民生活水平的不断提高对住房质量提出了更高的要求加速了房地产开发的进程,这也使城市用地面积有了很大的扩展,由图 7 可以看出,西安市的人口逐年呈上升趋势,且近

几年的增长率略高于前几年。此外,城镇居民人均住房使用面积已由 2000 年的 10.70 m^2 增加到 2003 年的 12.06 m^2 ,全市房地产年开发量由 2000 年的 763 万 m^2 上升至 2003 年的 1336 万 m^2 ,使得西安市周边原有的大片农业用地转化为城镇建设用地,从而加快了城市扩张速度。

4.2.4 交通基础设施的发展 城市沿着公路、铁路等主要交通干线发展是城市发展的一大特点,西安市也不例外。西安作为陕西省的省会,公路网四通八达,比较密集,主要线路有西宝高速公路,西万公路,西临公路、西阎公路以及绕城高速公路,西宝高速是西安连接宝鸡及陕西西部的重要交通要道,西万公路是西安通往陕西南部的枢纽,西铜公路使得西安与陕北有了快捷的联系,另外西临公路连接了陕西东部地区,密集的公路网有力的推进了城市的扩展,使城市的面积有了很大的增加。对比图 2 和图 3,就不难发现,西安的西北、西南以及北部的城市发展与西宝高速公路、西万公路及西铜公路是有很大大关系的。另外绕城高速公路对西安郊区的发展也起到了很大的推动作用。

5 结论与讨论

(1) 在城市边界信息提取方面,可以通过监督分类法和归一化裸露指数 (NDBI) 法实现,但采用 NDBI 法时,由于裸地与城区的光谱差异较小,因此它成为提取城区信息的主要噪音,在 NDBI 法中如何减少裸地的影响,还需要进一步研究。查勇、杨山^[5,6]等采

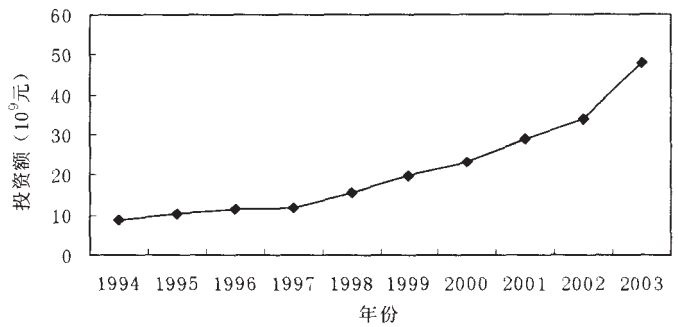


图 6 1994~2003 年西安市的全社会固定资产投资增长图

Fig. 6 Change of social capital assets investment in Xi'an (1994-2003)

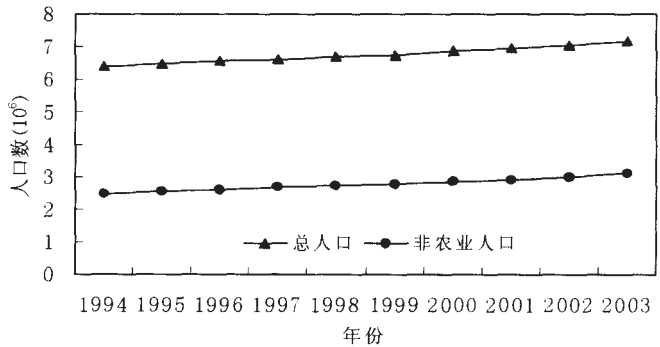


图 7 1994~2003 年西安市的总人口、非农业人口增长图

Fig. 7 Change of total population and non-agriculture population in Xi'an (1994-2003)

用 NDBI 指数提取了太湖地区的城市信息,认为这一方法比较可靠,但对于西北干旱区而言,这一方法的适用性有待进一步研究。本文同时也采用了监督分类的方法对西安市城区边界信息的提取,通过两种方法的比较,不难发现对于西部城市而言,为了减少裸地噪音的影响,监督分类的方法精度远高于 NDBI 法,它们的平均精度分别为 98.96% 和 78.75%,因此认为西部城市监督分类方法提取城区边界是可行的,同时根据 2000 年和 2003 年的城区边界对比分析,西安市城区面积净增 105.23 km^2 ,年增长速率达 12.3%。

(2) 综合分析影响西安市发展的各个因素,可以发现城市经济的快速发展是城市扩张的首要因素。西部大开发以来,西安市的 GDP 增长率高于全国及陕西省的平均水平,城市发展显示了勃勃生机。社会投资额的增加以及两大开发区的建立为西安市的发展提供了强劲的动力,这也是为什么西安市的主要扩张区在两大开发区的原因。

(3) 通过对西安市城市扩张的驱动力分析,可以更好地了解西部城市在西部大开发战略的推动下的发展机制,从而减少弯路,以利于更好的进行西部城市规划和生态建设。

参考文献 (References)

- [1] R Welch. Monitoring urban population and energy utilization patterns from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 9: 1-9.
- [2] Bazy Haack, Nevin Bryant, Steven Adams. An assessment of Landsat MSS and TM data for urban and near-urban land-cover digital classification. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21: 201-213.
- [3] Cuman P J, Pedley M I. Airborne MSS for land cover classification II. *Geocarto International*, 1990, 5: 15-26.
- [4] Harris P M, Ventura S J. The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, 61: 993-998.
- [5] Gao J, Skillloom D. Capability of SPOT XS data in producing detailed land cover maps at the urban-rural periphery. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 2877-2891.
- [6] Yang C J, Zhou C H. Extracting residential areas on the TM imagery. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(2): 146-150. [杨承建,周成虎.TM 影像的居民地信息提取方法研究.遥感学报,2000,4(2): 146-150.]
- [7] Zha Y, Ni S X, Yang S. An effective approach to automatically extract urban land-use from TM imagery. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(1): 37-40. [查勇,倪绍祥,杨山.一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法.遥感学报,2003,7(1): 37-40.]
- [8] Masek J G, Lindsay F E, Goward S N. Dynamics of urban growth in the Washington D C metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3473-3486.
- [9] Liu S H. Spatial patterns and dynamic mechanisms of urban land use growth. *Progress in Geography*, 2002, 21 (1): 43-50. [刘盛和.城市土地利用扩展的空间模式与动力机制.地理科学进展,2002,21(1): 43-50.]
- [10] Xu H Q. Spatial expansion of urban/town in Fuzhou and its driving force analysis. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002, 17(2): 86-92. [徐涵秋.福州市城镇空间扩展规律及其驱动机制分析.遥感技术与应用,2002,17(2): 86-92.]
- [11] Yang S. On extraction and fractional of urban and rural residential spatial pattern in developed area. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6): 671-678. [杨山.发达地区城乡聚落形态的信息提取与分形研究——以无锡市为例.地理学报,2000,55(6): 671-678.]
- [12] Sidjak R W, Wheate R D. Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20: 273-284.
- [13] Hall D K, Riggs G A, Salamonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54: 127-140.
- [14] Moffitts S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17: 1425-1432.
- [15] Gao B C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 257-266.

Dynamics of Urban Expansion in Xi'an City Using Landsat TM/ETM+ Data

W U Hong'an¹, JIANG Jianjun¹, ZHOU Jie², ZHANG Haibong¹, ZHANG Li¹, AILi²

(1. The College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China)

Abstract: In this study, we extracted urban boundary of Xi'an with supervised classification and Normalized Difference Barren Index (NDBI), respectively. Supervised classification is the most common method in obtaining land use/cover information. In this study, after data pre-processing, training samples were selected according to spectral features. Unlike conventional classification of land use/cover, in this paper, only two classifications of land cover were chosen, which were urban areas and non-urban areas. This could avoid the urban areas from the effects of too many classes, so that the urban areas could avoid being divided into too many classes. Then maximum likelihood classification was used to map the land use/cover of Xi'an. NDBI is an index like NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), which can reflect the information of barrens on the ground. As the spectrum of built-up area is similar to barrens, NDBI is used to obtain urban built-up information. Like NDVI, it is defined as $NDBI = (band5 - band4) / (band5 + band4)$. By comparing the two different methods, we find that the urban boundary derived from TM image using supervised classification is more accurate than that using NDBI, because the image of NDBI contains not only urban information but also barrens. What's more, it is difficult to distinguish them. Thus, we achieved urban expansion of Xi'an from 2000 to 2003 using supervised classification. Through the analysis of urban boundary of Xi'an in 2000 and 2003, it shown that during the three years, urban expansion in Xi'an was very quick. The urban area of Xi'an in 2000 was 253.37 km², but in 2003 it reached 358.60 km², an annual average increase rate of 12.3%. By analyzing related statistics of Xi'an, we drew the conclusion that the rapid urban expansion in Xi'an has been closely related to the fast growth of social capital assets investment and economic development of the Xi'an city since great development of western China. The statistic data show that during the three years from 2000 to 2003, the social capital assets investment rose from 23.2 billion RMB to 47.9 billion RMB, and the GDP of the city of Xi'an grew to 94.0 billion RMB from 64.3 billion RMB. In addition, the increase of population and the development of infrastructure like traffics are also important factors to it.

Key words: urban expansion; supervised classification; NDBI; driving force; Xi'an