

西安市不透水面的变化及其驱动力

周鹏, 谢元礼, 高志远, 蒋广鑫

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: [目的] 分析并监测城市不透水面动态变化, 为城市化和环境质量评价提供依据。[方法] 以陕西省西安市为研究区, 选取 Landsat 系列 1995, 2000, 2006, 2010, 2016 年 5 期遥感影像, 利用光谱混合分解法对西安市不透水面进行提取, 进而分析西安市 21 a 间不透水面的时空变化, 并对影响不透水面变化的驱动力进行分析。[结果] ①西安市不透水面面积所占比例不断攀升, 其中 2000 年至 2006 年年均增长最慢, 2010 年至 2016 年年均增长最快, 主城区增长最快时期为 2006 年至 2010 年。②空间变化上, 2006 年以前, 不透水面主要呈同心圆的模式, 以主城区为核心向外辐射扩张。2006 年以后, 各区县城和主城区的不透水面均大幅向外扩张, 呈现一主多次模式。③人口规模、经济发展、产业结构、规划政策与西安市不透水面的增加息息相关。[结论] 西安市不透水面扩张的时空变化基本反映了规划要求, 未来应加强城市副中心建设, 大力保护生态环境, 处理好城市化和不透水面扩张的关系。

关键词: 遥感; 不透水面; 光谱混合分解法; 驱动力; 西安市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)03-0274-08

中图分类号: TP79, X821

文献参数: 周鹏, 谢元礼, 高志远, 等. 西安市不透水面的变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 274-281. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.040; Zhou Peng, Xie Yuanli, Gao Zhiyuan, et al. Changes and driving forces of impervious surfaces in Xi'an City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 274-281.

Changes and Driving Forces of Impervious Surfaces in Xi'an City

Zhou Peng, Xie Yuanli, Gao Zhiyuan, Jiang Guangxin

(College of Urban and Environment Science, Northwestern University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: [Objective] The dynamic changes of impervious surfaces were analyzed and monitored to provide a basis for urbanization and environmental quality evaluation. [Methods] Xi'an City was taken as the study area, and remote-sensing imagery of Landsat series in 1995, 2000, 2006, 2010, and 2016 were used to extract impervious surfaces by means of a linear spectral mixture analysis method. Subsequently, spatial-temporal changes of impervious surfaces during 1995—2016 and the driving forces were analyzed. [Results] ① The proportion of impervious surfaces in Xi'an City increased, with the average annual growth rate being the minimum from 2000 to 2006 and the maximum from 2010 to 2016. The maximum growth period in the main urban area was from 2006 to 2010. ② In terms of spatial changes, before 2006, the impervious surface was in a concentric pattern, with the main urban area as the core that radiated outward. After 2006, the impermeable surface of each district and county and the main urban area expanded greatly outward, showing one main center and multiple subcenter modes. ③ Population size, economic development, industrial structure, and planning policies were closely related to the increase of the impervious surfaces of Xi'an City. [Conclusion] The spatial-temporal changes of the impervious-surface expansion in Xi'an City basically reflected the planning requirements. In the future, the construction of a subcentral city should be strengthened, the ecological environment should be vigorously protected, and the relationship between urbanization and impervious-surface expansion should be handled properly.

Keywords: remote sensing; impervious surface; spectral mixing analysis method; driving forces; Xi'an City

收稿日期: 2020-03-01

修回日期: 2020-04-10

资助项目: 陕西省自然科学基金研究计划“关中城市雾霾天气溶胶变化遥感监测与分析”(2017JM4035)

第一作者: 周鹏(1994—), 男(汉族), 湖北省十堰市人, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感图像目标要素识别与提取。Email: 834015756@qq.com。

通讯作者: 谢元礼(1968—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 副教授, 主要从事数字图像处理、环境遥感。Email: xieyuanli@126.com。

不透水面(impervious surface)是指由瓦片、沥青、塑料、金属以及混凝土等不透水性材料构成的道路、停车场、人行道、屋顶和城市景观等不透水表面的总和^[1-3],由于城市发展,其面积会持续增加,进而对城市防洪减灾、生态环境产生威胁。自20世纪后期引起国内外学者关注以来,对其研究的理论和方法已经取得了很大进展。

城市不透水面已经成为城市化过程和环境质量评价的重要指标^[4]。随着经济社会的发展,中国大量农村人口市民化,截至2016年,全国市区人口 7.55×10^8 人,占总人口54.59%,城市化率达57.35%,全国城区面积 $1.98 \times 10^5 \text{ km}^2$,建成区面积 $5.43 \times 10^4 \text{ km}^2$,分别占国土总面积的2.06%和0.57%^[5]。城市化过程中不透水面大量增加,不仅改变城市地表结构,而且城市热岛效应^[6-7]、城市内涝^[8-9]、流域水质^[10-11]、植物多样性^[12]等问题都与不透水面息息相关。因此,研究城市不透水面的变化具有重要的现实意义。

遥感技术的发展为全天候、多时序、大面积观测城市不透水面提供了重要手段。目前利用遥感影像提取不透水面的方法主要有光谱混合分解法^[13-15]、指数法^[16-17]和分类器模型法,常用的分类器模型有人工神经网络(ANN)^[18]、支持向量机(SVM)^[19]、随机森林(RF)^[20]等。使用的数据以光学遥感数据为主,部分研究者使用了SAR数据^[21-23]和夜间灯光数据^[24-26]。指数法目前应用的较为普遍,但是该方法大部分用到了热红外波段,由于热红外波段分辨率较低,且大部分遥感影像不具有热红外波段,其应用受到了一定的限制;分类器模型法提取精度与所选样本的质量紧密相关,而且算法复杂,耗时较大;光谱混合分解法是解决中低分辨率影像上存在混合像元问题的有效方法,在遥感信息反演中被广泛接受^[27-28]。它利用线性模型分解出每个像元中不同地物端元所占的比例,从而提高影像的解译精度。自从Ridd等^[29]1995年提出V-I-S模型以来,国内外许多学者基于光谱混合分解法开展对城市不透水面的研究,Yang等^[14]、Fan等^[30]、金晶等^[31]、李苗等^[32]分别对多伦多市区、广州市、上海市中心城区、哈尔滨城乡结合部的不透水面进行提取分析,得到了较好的效果。但是他们均是选择特定的小范围区域进行试验,对于大范围不透水面提取的适用性,值得进一步验证。

因此,本文选择世界名城、历史古都,国家中心城市的西安市作为研究区,利用光谱混合分解法进行大范围的不透水面提取,进而对西安市21 a间不透水面的时空变化情况及驱动力因素进行分析,以期对城市规划和可持续发展提供一定的参考。

1 研究区概况

西安市位于陕西省中南部,渭河流域中部关中平原,地处 $107^{\circ}24' - 109^{\circ}49' \text{ E}$, $33^{\circ}42' - 34^{\circ}45' \text{ N}$ 之间,北临渭河和黄土高原,南邻秦岭,东以灞源山地为界,辖境东西长约204 km,南北宽约116 km,市域面积 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$,下辖11区2县并代管西咸新区。20世纪90年代以后,随着经济社会的发展,GDP从1995年的 3.30×10^{10} 元增长到2016年的 6.28×10^{11} 元,建成区面积由183 km^2 增加到566 km^2 ,截至2016年底,常住人口 8.83×10^6 人,城镇化率达73.43%^[33]。

2 材料与方 法

2.1 数据源及预处理

本研究使用的数据主要为遥感影像数据、西安市行政矢量数据以及中国统计年鉴和西安市统计年鉴。遥感影像数据来源于美国地质调查局(<https://glovis.usgs.gov/>),主要包括1995,2000,2006,2010年4期Landsat TM数据和2016年Landsat OLI数据。统计年鉴数据分别来自于国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn/>)和西安市统计局网站(<http://tjj.xa.gov.cn/>),包括人口数据、经济数据、建成区面积、城市化率数据等。

采用二次多项式对研究区不同时相的遥感影像进行几何精校正,使配准的均方根误差小于0.5个像元,同时,为了消除大气散射和吸收、太阳高度变化和地形起伏等因素对地表辐射产生的影响,对获取的遥感影像进行大气校正。对影像进行几何校正和辐射校正之后,将覆盖研究区的3景影像进行镶嵌,最后按西安市边界矢量对影像进行裁剪,得到5期影像数据。

2.2 研究方法

2.2.1 线性光谱混合分解法 线性光谱混合分解(LSMA)法是把混合像元的光谱反射率模拟为该像元中所有地物端元(endmember)的反射率以及各端元所占像元面积比为权重系数的线性组合,分解出各种地物端元在像元中所占的比例。线性光谱混合模型如公式(1)^[34]:

$$R_b = \sum_{i=1}^n (f_i R_{ib} + e_b) \quad (1)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n f_i = 1, \quad 0 \leq f_i \leq 1 \right)$$

式中: R_b 是影像第**b**波段反射率; $b=1,2,3,\dots,m$ 为光谱波段数; f_i 是终端地类*i*的权重,根据地类*i*所占像元面积的比例确定; n 是终端地类的数目; R_{ib} 是终端地类*i*在**b**波段的反射率; e_b 是残差。而模型的正确性要通过检验影像中每个波段残差 e_i 的均方根

来确定。其公式为:

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (e_i^2 - m)} \quad (2)$$

式中:RMS 代表残差 e_i 的均方根; m 是影像中的波段数。

2.2.2 修正归一化水体指数 徐涵秋^[35]在归一化水体指数(NDWI)的基础上,分析水体及其他地物的光谱特征,将 NDWI 中的近红外波段用中红外波段替换,提出改进的归一化水体指数(MNDWI),该指数提取水体的效果更佳,不仅可以有效消除植被信息,而且还可以快速提取城市范围内的水体,得到了广泛的应用。其公式为:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Band}_2 - \text{Band}_5}{\text{Band}_2 + \text{Band}_5} \quad (3)$$

式中:Band₂ 为绿光波段,Band₅ 为中红外波段。

2.2.3 不透水面提取 根据线性光谱混合分解法的原理,首先对遥感影像进行最小噪音分离(minimum noise fraction, MNF)变换,其本质是两次重叠的主成分变换,目的是降低数据维数,分离数据中的噪声,使最大信息量集中在少数几个波段。接着,选取 MNF 变换后的前 3 个分量两两组合构建二维散点图,选择散点图的凸出部分构造地物端元波谱,结合散点图的特征空间以及端元波谱与研究区影像上主要地物波谱曲线的对比,最终确定 4 种端元类型,它们是高反照率、低反照率、植被以及土壤。然后,通过线性光谱分解获得 4 种端元的分量影像,由于不透水

面的光谱响应具有发散性,是低反照分量和高反照分量的线性组合^[36],所以,将两分量影像相加,得到不透水面丰度图^[31],利用大津算法^[37]得出的丰度阈值基础上,结合原始影像以及同期的 Google Earth 高清影像人机交互,确定最终不透水面提取阈值。最后,利用改进的归一化水体指数将提取结果中的水体进行掩膜。

2.2.4 不透水面扩张等扇方位法 等扇方位法用于定量地描述不透水面扩张在不同方向上的分异性^[38]。一般选定城市中心为原点,取适当半径将研究区划分成相等的扇面,分别统计不同时期各个扇面内不透水面的面积,从而分析不透水面在不同方向上的扩张情况。

3 结果与分析

3.1 不透水面提取结果

利用线性光谱混合分解法依次提取西安市 1995,2000,2006,2010,2016 年的不透水面,结果如图 1 所示。对所提取的 5 个年份的不透水面分别随机取点 2000 个与同期的 Google Earth 高分辨率影像(1995 年 12 月 31 日、2000 年 3 月 30 日、2006 年 12 月 31 日、2010 年 11 月 13 日、2016 年 8 月 12 日)进行比对,人机交互验证^[39]。经验证,每个年份的不透水面提取总体精度(OA)都超过 82.0%,基本符合本次试验要求。

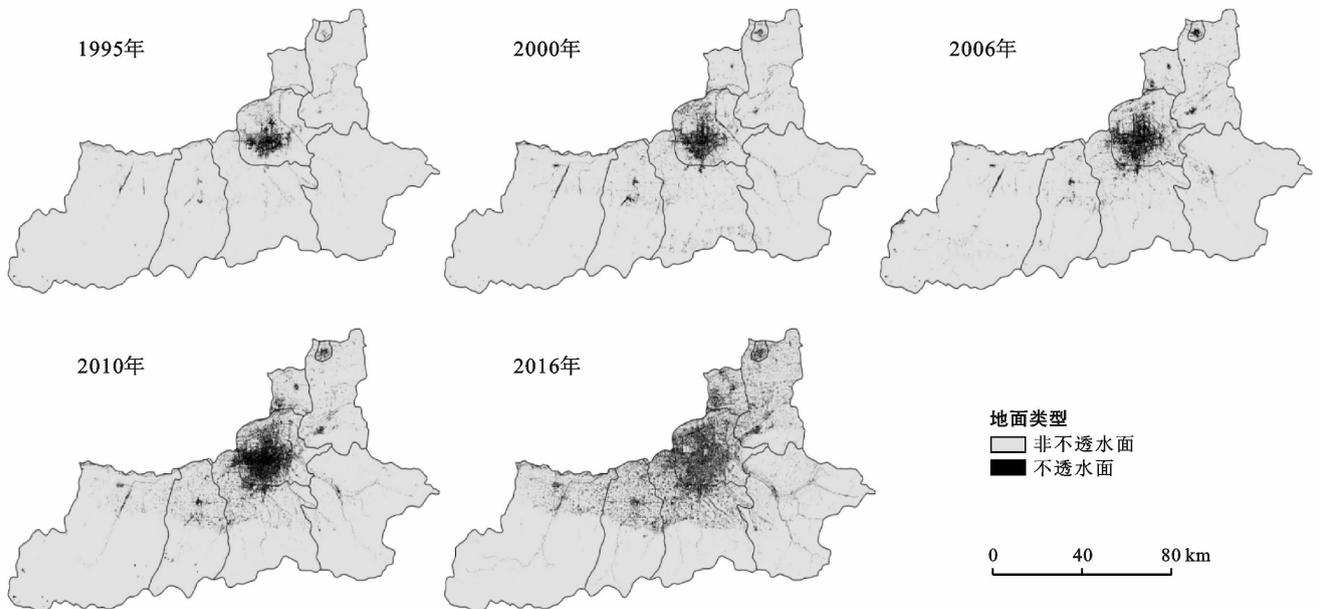


图 1 1995—2016 年西安市不透水面提取结果

3.2 不透水面变化分析

3.2.1 不透水面时间变化分析 分别对 1995,

2000,2006,2010,2016 年研究区不透水面面积进行统计,结果见图 2。可以看出,西安市 21 a 间不透水面

扩张显著,面积增加 817.98 km²,累计增长 437.56%,年均增长 21.88%。不透水面面积占西安市域面积的比重由 1995 年的 1.85% 增加至 2016 年的 9.93%。为了更直观地了解西安市各时间段不透水面的变化情况,分阶段进行统计(见表 1)。结果表明,1995—2000 年,不透水面增长率最快,年均增长 14.91%,2000—2006 年,不透水面增长率最慢,年均增长 5.54%,2006 年以后,不透水面年均扩张面积最大,达 56.92 km²。

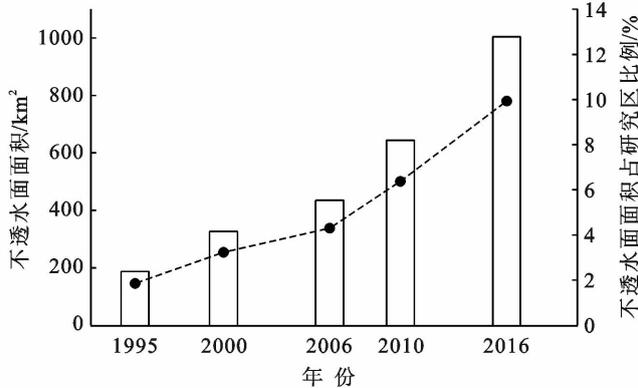


图 2 1995—2016 年西安市不透水面面积统计结果

表 1 西安市各时间段不透水面变化情况

年份	不透水面面积		
	增加/km ²	增长率/%	年均增加/km ²
1995—2000	139.39	74.56	29.68
2000—2006	108.45	33.23	18.06
2006—2010	209.30	48.14	52.33
2010—2016	359.94	55.88	59.99

利用 ArcGIS 软件平台,以西安市的行政区划为单位(这里为了说明西安城区不透水面变化的完整性、统一性,将碑林区、莲湖区、灞桥区、雁塔区、未央区、新城区作为主城区进行统计),分区统计不透水面的变化情况,见表 2。可以看出,西安市 21 a 间,主城区不透水面面积增加了 229.23 km²,年均增加 7.91%。不透水面扩张速度最快的是蓝田县,21 a 间面积增加了 24 倍多。为了能够直观的看出各区县不同时间段不透水面的增长情况,分阶段进行统计,见图 3。西安市主城区不透水面在 2006 年至 2010 年间,年均增加面积最大,为 25.42 km²,2010 年以后,增长速度迅速下降。长安区和临潼区的不透水面分别在 2006 年和 2010 年以后扩张明显加快,其他区县不透水面面积逐年增加,2010 年以后则明显加快。

表 2 1995—2016 年西安市分区域不透水面面积统计

地区	不透水面面积/km ²					累计增加率/%
	1995 年	2000 年	2006 年	2010 年	2016 年	
主城区	137.96	203.30	257.78	359.47	367.19	166.16
阎良区	2.25	6.17	9.34	9.65	13.11	482.67
临潼区	7.87	17.19	26.31	37.16	114.82	1 358.96
高陵区	3.89	7.47	13.84	29.10	64.17	1 549.61
长安区	9.80	35.67	48.06	103.87	194.56	1 885.31
鄠邑区	8.40	19.23	34.35	49.73	98.74	1 075.48
蓝田县	2.43	9.81	12.32	19.94	62.00	2 451.44
周至县	14.35	27.49	32.78	35.16	89.43	523.21

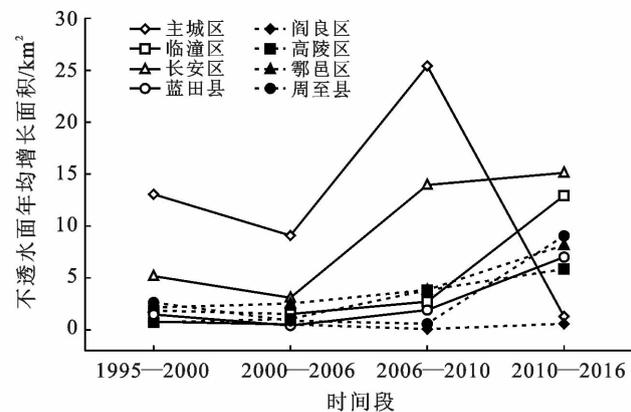


图 3 1995—2016 年西安市不同时间段各区不透水面年均增长面积

3.2.2 不透水面空间变化分析 为了揭示西安市不透水面扩张在空间方位上的变化情况,文章选用等扇

方位法,以钟楼为圆心,以 26 km 为半径画圆,以东偏北 22.5° 为起点,将圆分成相等的 8 个扇形,以扇形为单位分别统计不同年份的不透水面面积,分析不同时间段不透水面在各方位上的扩张情况(如图 4 所示)。可以发现,研究期内不同时间段西安市不透水面扩张的方向存在较大差异,其中,1995—2000 年,不透水面主要由主城区向西、西北、西南和北部 4 个方向扩张;2000—2006 年,不透水面向西南部增加较快;2006—2010 年,不透水面由主城区向东北、西、西南 3 个方向均扩张明显;2010—2016 年,不透水面向东北部和南部大幅扩张;总的来看,研究期内西安市不透水面向东北部和西南部扩张最为明显,东部和东南部增加较少,基本以主城区为圆心呈同心圆式向外扩张为主。

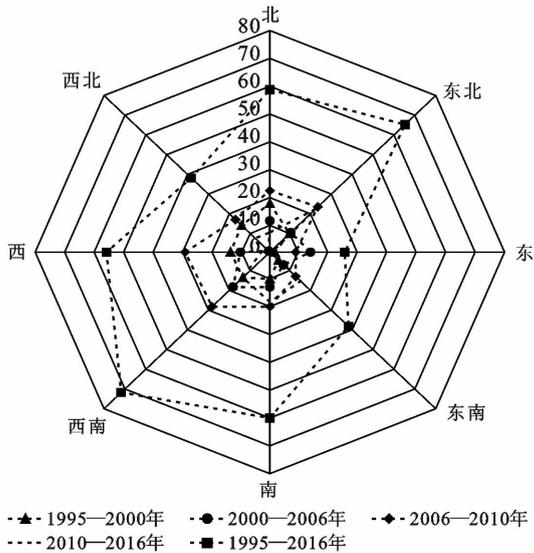


图 4 1995—2016 年西安市不同时间段不透水面扩张方位雷达图

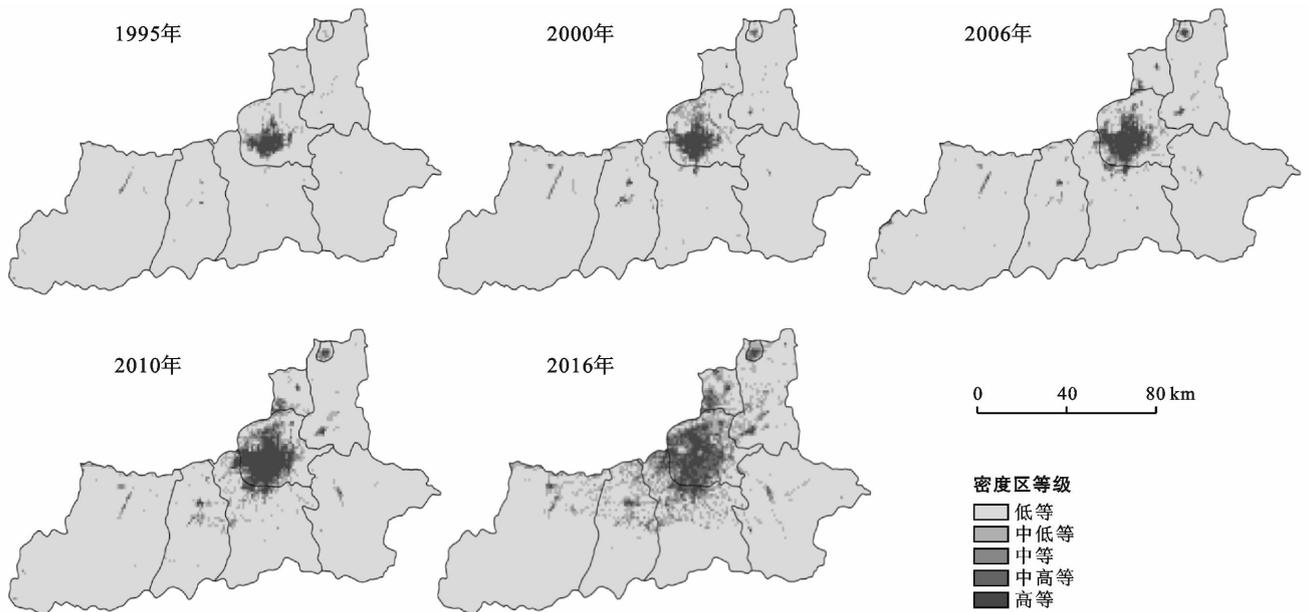


图 5 1995—2016 年西安市不透水面密度分布特征

3.3 不透水面变化驱动力分析

史培军等^[40]将国内生产总值、人口数量、外资利用额、基本建设投资、三产产值分别占国内生产总值的百分比等几个因子归为土地利用变化机制的外在驱动力。李苗等^[32]从经济因素、人口因素和规划引导因素 3 个方面对哈尔滨城乡结合部的不透水面变化进行定性分析。本文参考前人的研究成果,从经济方面、人口方面,对西安市不透水面扩张进行定量分析,从产业结构、规划政策方面对不透水面变化进行定性分析。

3.3.1 不透水面变化与经济的关系 西安市作为中国西北地区唯一的中心城市,在国家“西部大开发”战略、“一带一路”建设等政策支持下,经济社会乘势发

展。GDP 由 1995 年的 3.30×10^{10} 元,增长到 2016 年的 6.28×10^{11} 元,21 a 间经济增长了 19 倍。为了说明西安市不透水面与 GDP 的关系,将各区县 1995, 2000, 2006, 2010, 2016 年的 GDP 数据与对应年份的不透水面面积进行相关性分析, Pearson 系数为 0.916, 说明 GDP 规模与不透水面面积有极强的相关性,进一步分析发现不透水面与经济总量有明显的正相关性 ($R^2 = 0.835$), 如图 6 所示。随着经济的快速发展会加速不透水面的扩张, 蓝田县 21 a 间 GDP 增长 15 倍, 不透水面面积增加 24 倍多, 长安区 2006 年以后 GDP 年均增长 59.8%, 不透水面面积年均增长 30.48%。整个研究期内, 西安市 2000 年至 2006 年 GDP 年均增长率最低, 为 11.61%, 同期的不透水面扩张速率也较慢。

3.2.3 不透水面密度变化分析 为了进一步分析西安市不透水面的密度变化, 将整个研究区划分为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格, 分别覆盖 5 期不透水面提取结果, 并统计每个网格内不透水面占比, 然后按 $< 15\%$, $15\% \sim 30\%$, $30\% \sim 45\%$, $45\% \sim 60\%$, $> 60\%$ 这 5 个等级将不透水面划分为低密度区、中低密度区、中密度区、中高密度区、高密度区得到 5 期不透水面密度分布结果(见图 5)。

可以发现, 1995—2010 年, 西安市不透水面以中高密度区为主, 主要表现为集聚。2010 年以后, 开始出现大量中低密度区, 主要变为由集聚向分散转变。主城核心区不透水面经历了 1995—2010 年高强度发展, 2010—2016 年出现密度下降的趋势, 部分高密度区转为中高密度区。

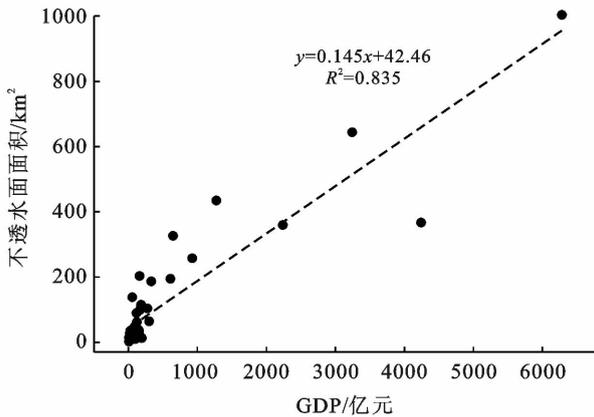


图6 西安市不透水面面积与GDP的线性拟合

3.3.2 不透水面变化与人口的关系 人口一直都是城市构成中最活跃的因素,对城市发展有重要的影响^[41]。西安市总人口由1995年的 6.48×10^6 ,增加到2016年的 8.83×10^6 ,城镇人口由 3.93×10^6 增加到 6.49×10^6 ,年均增长分别为 1.18×10^5 人和 1.22×10^5 人。每年大量人口涌入城市,直接带动围绕人口增长所带来的住房需求,道路、水利和电力等基础设施建设以及教育、就业、医疗和娱乐等公共服务设施建设。这些住房的增加和设施的建设会占用大量土地,增加不透水面面积。为了探讨西安市不透水面与人口数量的关系,将各区县1995,2000,2006,2010,2016年的人口数据与对应年份的不透水面面积进行相关性分析,Pearson系数为0.887,说明人口数量与不透水面面积有极强的相关性,进一步分析发现不透水面与人口数量有显著的正相关性($R^2 = 0.783$),结果见图7。因此,人口数量增加是西安市不透水面扩张的重要因素。

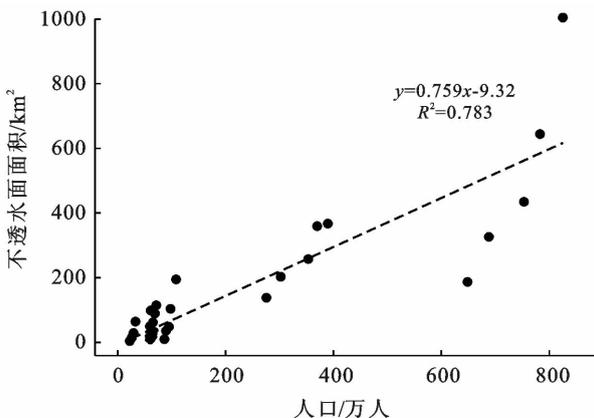


图7 西安市不透水面面积与人口的线性拟合

3.3.3 不透水面变化与产业结构的关系 西安市作为历史古都、旅游名城,旅游业和服务业发达。1995年第一、二、三产业比重为12.53:40.97:46.5发展

到2016年为3.69:35.02:61.29。第二、三产业占比由87.47%增加到2016年的96.31%,产值由 2.89×10^{10} 元,增长到 6.05×10^{11} 元^[33]。第二产业和第三产业的快速发展,一方面使工业用地和服务性设施建设大规模扩张,工业厂房和设施建设使地表硬化,不透水面增加,另一方面又会吸引大量劳动力进入城市到第二、三产业就业,人口的增加直接刺激了住房需求,从而带动房地产开发和其他基础设施建设,使不透水面面积进一步增加。

3.3.4 不透水面变化与规划政策的关系 第三轮西安城市总体规划指出,到2010年引导城市向多中心的空间模式发展。在此规划政策引导下,截至2010年,西安市不透水面基本形成以主城区为核心,各区县城为次核心的一主多次分布格局。第四轮西安城市总体规划明确到2020年,构建“一城、一轴、一环、多中心”的城市总体空间格局。受到此轮规划影响,西安市主城区规划范围基本保持不变,因此2010年以后,主城区不透水面趋于饱和而增加缓慢;以陇海线为主轴和以关中环线为纽带的城市规划布局,极大促进了沿线中小城镇的发展,使城镇、村庄不透水面规模扩大,长安区尤为突出;规划要求高起点规划和建设临潼、鄠邑、阎良3个副中心城市,受此驱动,大规模的开发建设使临潼、鄠邑、阎良三地在2010年以后不透水面扩张速度明显加快。另外,截至“十二五”期末,西安市城市化率提高到73%,大量人口市民化,使不透水面面积增加。全社会固定资产投资年均增长14.9%,完成86个城中村,63个棚户区征收搬迁,回迁安置群众 2.60×10^5 人^[42]。大规模的棚户区、城中村改造,安置房建设以及相关配套设施的完善,极大的推动了城市不透水面的扩张。值得注意的是“十二五”期间,西安市新建成绿地广场678个,开放公园30个,新增城市绿地 1.93×10^7 m²,建成区绿化覆盖率由2010年的37%提高到42.5%,这间接地揭示了2010—2016年主城区部分高密度不透水面区转变为中高密度区的原因。总体上,西安市不透水面的时空演变与规划格局一致,表明规划政策对城市扩张有重要影响。

4 结论

(1) 本文将遥感和GIS相结合,利用线性光谱混合分解法从卫星遥感影像上提取出西安市1995,2000,2006,2010,2016年的不透水面信息,经验证,该方法总体精度在82%以上,精度较高,并且对于大范围内不透水面信息的提取,效果较好。因此,线性光谱混合分解法是中低分辨率遥感影像下,较为理想的一种不透水面信息提取方法。

(2) 西安市不透水面在 21 a 间扩张显著,不同时间段时空变化和密度变化上存在差异。时间变化上,不透水面面积增加了 817.08 km²,其中 1995—2000 年增加较快,城市扩张明显;2000—2006 年增长较慢,城市扩张进入缓慢期;2006 年以后,西安市进入新一轮快速扩张期。空间变化上,2006 年以前,不透水面主要呈同心圆的模式,以主城区为核心向外辐射扩张,2006 年以后,各区县城和主城区的不透水面均大幅向外扩张,呈现一主多次模式。密度变化上,1995—2010 年,西安市不透水面以中高密度区为主,2010 年以后,出现大量中低密度区域。

(3) 总的来看,研究期内西安市不透水面的时空变化基本与同期的规划相吻合,落实规划力度较大,西安市虽然多轮规划都强调避免城市“摊大饼式”发展,但实际上并未能跳出由城市中心向四周辐射扩张的传统城市发展道路,未来应加强城市副中心建设,转移部分功能和产业至区县,推动区域协调发展,由此,增加中低密度不透水面区域,减少不透水面高度聚集造成的生态环境问题。

(4) 本文着重从经济和人口方面进行定量分析,从产业结构、规划政策方面进行定性分析,结果表明西安市人口规模与经济发展对不透水面的扩张有显著的正相关性,随着城市化进程推进,城市人口增加以及经济的发展,西安市不透水面会继续扩张,由此会导致诸如城市热岛、环境污染、生态恶化等城市发展问题,因此,西安市应优化城市设计,大力保护生态环境,处理好城市化和不透水面扩张的关系。

[参 考 文 献]

- [1] Schueler T R. The importance of imperviousness [J]. *Watershed Protection Techniques*, 1994,1(3):100-101.
- [2] Zhuo Li, Shi Qingli, Tao Haiyan, et al. An improved temporal mixture analysis unmixing method for estimating impervious surface area based on MODIS and DMSP-OLS data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 142: 64-77.
- [3] 徐涵秋,王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1270-1289.
- [4] Weng Qihao. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 34-49.
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. 北京: [2019-11-05] (2020-03-01). <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>
- [6] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890-3901.
- [7] Yuan Fei, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 375-386.
- [8] Shuster W D, Bonta J, Thurston H W, et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review [J]. *Urban Water Journal*, 2005, 2(4): 263-275.
- [9] Sofia G, Roder G, Dalla Fontana G, et al. Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40527.
- [10] Sun Zhongchang, Wang Cuizhen, Guo Huadong, et al. A modified normalized difference impervious surface index (MNDISI) for automatic urban mapping from landsat imagery [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 942.
- [11] 毕森,王恒,张丽,等. 基于不透水面的海南港口城市扩张分析[J]. *应用科学学报*, 2017, 35(3): 346-354.
- [12] Yan Zhaogui, Teng Mingjun, He Wei, et al. Impervious surface area is a key predictor for urban plant diversity in a city undergone rapid urbanization [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 335-342.
- [13] 李波,黄敬峰,吴次芳. 基于热红外遥感数据和光谱混合分解模型的城市不透水面估算[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1590-1600.
- [14] Yang Jian, He Yuhong. Automated mapping of impervious surfaces in urban and suburban areas: Linear spectral unmixing of high spatial resolution imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 53-64.
- [15] 谢慧君,李崇巍,张亚娟,等. 基于光谱混合分解的流域不透水面提取及其动态分析: 以于桥水库为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(10): 34-37.
- [16] Fang Hong, Wei Yuchun, Dai Qiuping. A novel remote sensing index for extracting impervious surface distribution from landsat 8 OLI imagery [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(13): 2631.
- [17] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(11): 1150-1153.
- [18] Hu Xuefei, Weng Qihao. Estimating impervious surfaces from medium spatial resolution imagery using the self-organizing map and multi-layer perceptron neural networks [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2089-2102.
- [19] Tehrani M S, Pradhan B, Jebuv M N. A comparative assessment between object and pixel-based classification approaches for land use/land cover mapping using spot 5 imagery [J]. *Geocarto International*, 2014, 29(4): 351-369.
- [20] Pelletier C, Valero S, Inglada J, et al. Assessing the robustness of random forests to map land cover with

- high resolution satellite image time series over large areas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 156-168.
- [21] 张鸿生, 林殷怡, 王挺等. 融合光学与雷达遥感数据的城市不透水面提取方法[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(3): 39-46.
- [22] Zhang Yuanzhi, Zhang Hongsheng, Lin Hui. Improving the impervious surface estimation with combined use of optical and SAR remote sensing images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 141: 155-167.
- [23] Zhang Hongshen, Lin Hui, Wang, Yunpeng. A new scheme for urban impervious surface classification from SAR images [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*[J]. 2018, 139: 103-118.
- [24] Im J, Lu Zhenyu, Rhee J, et al. Impervious surface quantification using a synthesis of artificial immune networks and decision/regression trees from multi-sensor data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 102-113.
- [25] 易佳思, 胡翔云. 基于 Crabcut 融合多源数据提取不透水面[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(3): 174-180.
- [26] 程熙, 吴炜, 夏列钢, 等. 集成夜间灯光数据与 Landsat TM 影像的不透水面自动提取方法研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1364-1374.
- [27] van de Voorde T, de Roeck T, Canters F. A comparison of two spectral mixture modelling approaches for impervious surface mapping in urban areas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(18): 4785-4806.
- [28] Weng Qihao, Hu Xuefei, Lu Dengsheng. Extracting impervious surfaces from medium spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery: A comparison [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(11): 3209-3232.
- [29] Ridd M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [30] Fan Fenglei, Fan Wei, Weng Qihao. Improving urban impervious surface mapping by linear spectral mixture analysis and using spectral indices [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2015, 41(6): 577-586.
- [31] 金晶, 王斌, 张立明. 基于线性光谱混合分析的城市不透水层分布估算[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2010, 49(2): 197-208.
- [32] 李苗, 臧淑英, 吴长山, 等. 哈尔滨市城乡结合部不透水面时空变化及驱动力分析[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 105-115.
- [33] 西安市统计局. 西安市统计年鉴[EB/OL]. 西安: [2019-11-20](2020-03-01). <http://tjj.xa.gov.cn/tjsj/tjxx/1.html>.
- [34] 岳文泽, 吴次芳. 基于混合光谱分解的城市不透水面分布估算[J]. *遥感学报*, 2007, 11(6): 914-922.
- [35] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [36] Wu Changshan. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM⁺ imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(4): 480-492.
- [37] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*, 1979, 9(1): 62-66.
- [38] 沈非, 袁甲, 黄薇薇, 等. 基于地学信息图谱的合肥市城市扩展时空特征及驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(2): 202-211.
- [39] 徐涵秋, 林中立, 潘卫华. 单通道算法地表温度反演的若干问题讨论: 以 Landsat 系列数据为例[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(4): 487-492.
- [40] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 151-160.
- [41] 冯珊珊, 樊风雷. 2006—2016年粤港澳大湾区城市不透水面时空变化与驱动力分析[J]. *热带地理*, 2018, 38(4): 536-545.
- [42] 西安市人民政府. 西安市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. 西安: [2019-12-20](2020-03-01). <http://www.xa.gov.cn//>.