
基于不透水表面指数的城市 扩张趋势及驱动机制分析 ——以南京市为例

李发志¹ 朱高立² 姬超¹ 侯大伟¹ 孙华¹¹

(1. 南京农业大学 土地管理学院, 江苏 南京 210095;

2. 南京财经大学 公共管理学院, 江苏 南京 210023)

【摘要】: 城市扩张趋势及驱动机制研究存在两大难题: (1) 传统景观数据的混合像元问题影响城市扩张趋势研究的准确性; (2) 城市扩张驱动因子的共线性问题影响驱动机制研究结论的可靠性。针对上述问题, 以南京市为例, 利用不透水表面分析结果, 采用不透水面加权平均重心分析、线性方向均值分析及标准差椭圆分析方法开展 2000~2017 年城市扩张趋势研究, 并利用偏最小二乘回归分析方法对城市扩张驱动机制开展定性及定量分析。结果表明: 南京市整体上表现为多中心非同步的蔓延式扩张; 2000~2017 年的 3 个时间跨度内, 南京市整体的不透水表面扩张速度不断增长, 年均不透水表面加权平均重心转移距离分别为 303, 379, 611m, 全市尺度上往顺时针偏北 259.12° 方向转移 2564m, 具体到各辖区, 重心转移距离存在较大差异; 城市扩张的外部形态特征具有明显的方向性, 2000、2005、2010 以及 2017 年 4 个时期, 不透水表面的标准差椭圆扁率均在 2.232 以上, 主要表现为南北向扩张, 各辖区扩张方向性不同; 城市外部空间特征及发展战略、河流水系及自然保护区分布、土地利用规划等因素表现为对城市扩张方向的约束和限制作用; 第二产业从业人员数量、人口密度、第三产业固定资产投资额、地区生产总值、城乡人均可支配收入等因素成为影响城市扩张规模的主要因素。

【关键词】: 不透水表面 城市扩张 空间特征 驱动机制

【中图分类号】: F127; F299.23 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0575-16

城市扩张趋势与驱动机制研究是了解城市成长外部形态及内部机理的过程, 一直以来都是地理学相关研究的热点问题^[1~3]。特别是自 21 世纪以来, 全国范围内城镇化进程加快的同时建设用地呈现蔓延式扩张^[4], 占用耕地资源威胁粮食安全, 同时也对生态环境造成不利影响。在快速城镇扩张的形势下, 城市扩张趋势与驱动力研究成为决策部门及管理者规划与控制城市发展的重要依据。

建设用地规模及空间格局变化特征是衡量城市扩张趋势最常用指标, 国内外已经有大量研究成果以此为切入点开展城市扩

作者简介: 李发志(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为国土规划及 3S 技术. E-mail: lfz.86@163.com

孙华, E-mail: sh@njau.edu.cn

基金项目: 南京市社会科学基金项目(18CB10); 自然资源(耕地)资产负债表编制试点(C0202000310)

张趋势研究^[5~12]。根据研究对象的不同可划分为两大类：一类是利用土地利用/覆被变化空间数据，开展建设用地规模变化及空间分布特征研究^[7~12]。如刘纪远等^[9]利用 2000、2010 以及 2013 年三期全国尺度的土地利用数据分析全国城乡建设用地变化趋势分析并探讨国家主体功能区划对建设用地变化的影响，结果表明不同国家功能区对建设用地增长的影响力不同；Ma Yue-liang 等^[11]以 Landsat 遥感影像数据为基础采用监督分类方法，对不同时期的广州市建成区扩张趋势进行研究，认为城市扩张速度在不同时期存在较大差异，东部尤为突出。另一类是以建设用地利用产生的社会、经济、生态效应作为研究对象开展的用地结构、规模、强度、效率等变化趋势特征分析^[5,6,13]。如刘艳君等^[6]对东北地区 2000~2015 年的建设用地开发强度空间演变趋势进行定量研究，认为该地区建设用地开发强度整体呈增长趋势，空间分布趋于非均衡；邹欣怡等^[13]基于重庆市多期 TM 遥感影像，通过目视解译提取建成区的方法，研究城市扩张趋势，并采用压力状态响应模型，评价城市用地扩张的生态环境效应，结果表明研究期内城市边界扩展明显，建设用地扩张对生态环境有负面影响。两者均采用土地利用/覆被数据或者统计数据开展研究，优点在于方便宏观尺度研究建设用地变化的总体特征以及进行空间相关关系研究，然而缺点在于混合的土地利用像元被看作单一土地覆盖类型的纯净像元导致建设用地景观数据通常是基于其用地边界，这种景观数据在微观尺度城市扩张趋势研究中产生较大误差。同时，这种基于建设用地边界的研究，时效性较差，不能准确反映城市用地变化趋势，并且随着社会健康发展，居民对公共绿色空间的需求不断提高，新开发的建设用地多预留大量绿色空间，“建设用地”也不能反映城市建设的用地状况。近年来不透水表面被广泛应用到土地覆被变化及其生态环境效应的研究中^[14~21]。“不透水表面”剔除了传统“建设用地”景观数据中的水体、绿地等自然地表部分，仅保留道路、建筑物、广场、停车场等人工不透水面部分。这种兼顾景观尺度和亚像元尺度数据，可以提高研究数据精度，解决传统景观类型数据因包含混合像元而产生分类误差的问题^[17]。城市的扩张是以地表各类不透水面不断蔓延和填充为特征的过程，因此利用不透水表面结合相关的空间分析方法开展城市扩张趋势的研究理论上可以实现并提高研究的准确性。

自然因素以及人文(社会、经济、政策)因素是影响城市扩张的主要驱动因素，已有大量的研究针对不同尺度或者区域开展城市扩张驱动机制的定量及定性探讨^[2,4,7,22~26]。如黄保荣等^[4]利用空间回归模型以地级行政区为分析单元，对中国大陆地区 2000~2010 年间建设用地扩张的驱动力进行研究，结果表明，中国建设用地扩展在自然因素方面受海拔坡度等地理因素的影响，同时，第二产业的快速发展、流动人口的迁移、固定资产投资、外商投资等因素是主要人文驱动因素，而第三产业发展一定程度上起到抑制建设用地扩张的作用。张雪茹等^[23]利用典型相关性分析与主成分分析方法对南京市 2000~2014 年间的建设用地变化人文因素的驱动力进行研究，认为人口增长、道路扩展、投资水平和文化产业、园林绿地、道路建设等是对建设用地扩展有正向作用因子。熊昌盛等^[27]采用无序多分类 Logistic 回归模型，分析了 2006~2014 年间义乌商住用地与工业用地扩展驱动力差异，结果表明，商住用地与工业用地扩张均受到自然环境、社会经济区位、邻域状态及空间政策等多重因素的综合影响，但也存在明显的内部差异。然而，城市扩张的潜在人文驱动因素多存在指标共线性问题，已有研究中采用的相关研究方法如多元回归分析、典型相关分析、主成分分析、空间回归分析等^[4,25,27]无法解决共线性问题而影响了研究结果的可靠性，城市扩张驱动机制的研究还有待进一步深入探讨。1983 年由 Wold 等^[28]提出用于解决化学样本分析中存在的变量多重相关以及解释变量多于样本点等问题偏最小二乘(Partial Least Squares, PLS)回归分析方法，综合了典型相关分析、主成分分析以及线性回归分析，最大的优势在于能够解决指标共线性及变量数量少的问题，近年来，不断发展并被应用于社会科学及自然科学其他领域^[29~33]。回顾已有研究，未见 PLS 回归分析法被应用到城市扩张驱动力研究中。应用 PLS 开展城市扩张驱动机制的研究理论上可以解决以往研究中存在的不足，提高研究结论的可靠性。

综上，为解决到城市扩张趋势及驱动力研究中存在的不足，本研究拟基于不透水表面采用多种空间分析方法(加权平均重心分析、线性方向均值分析、标准差椭圆分析)开展城市扩张趋势特征研究，并利用 PLS 回归分析方法深入探讨城市扩张的主要驱动机制。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域

在中国快速城镇化的背景下，南京市正经历快速的城镇化过程。2017年，江苏省南京市常住人口680.7万人，人口城镇化率已经达到82.29%，与同时期全国58.52%的平均城镇化率相比，属于高度城镇化区。据统计，2000~2017年常住人口数量增长24.92%，同时南京市建城区面积增长了91.51%，而从2013~2017年的5年时间跨度来看，建成区面积以年平均增长3.78%的速度增长。从发展态势来看，在未来很长一段时间，南京市作为新一线城市，还将面临大量人口增长与经济发展占用城市空间与土地资源的问题。了解城市扩张趋势，辨别其主要驱动机制，对于宏观调控社会系统各方面的协调发展，缓解资源环境压力，实现可持续发展具有重要意义。南京市作为快速城镇化的城市，在全国具备很强的典型代表性，城市建设在全省乃至全国均有示范作用，本研究以南京市为例开展城市扩张趋势及驱动力机制研究，一方面理论上丰富相关研究的理论体系，另一方面在现实应用中了解南京市城市扩张问题，供其他城市借鉴。

南京市共下辖11个区，由于玄武区、秦淮区、鼓楼区、建邺区、栖霞区、雨花台区等6个市中心区辖区面积较小，本研究中统称为“市中心六区”，其余5个辖区分别为六合区、浦口区、江宁区、溧水区、高淳区。

1.2 数据来源

不透水表面提取所采用的研究数据为2000、2005、2010、2017年4个年度不同时期的Landsat TM/ETM+影像数据，以及相应4个时期的Google高清航片。为了增加地物对比度，提高混合像元分解精度，遥感影像数据选择在季节上考虑地物的季节特征，主要选择6~11月的数据。所有研究区域的陆地卫星表面反射率产品均从美国地质调查局(USGS)地球资源观测与科学(Earth Resources Observation and Science, EROS)中心科学处理器(Center Science Processing Architecture, CSPA)下载(<https://espa.cr.usgs.gov/>)。数据的详细情况如表1所示：

表1 Landsat TM/ETM+影像数据集列表

时间	传感器	条代号/行编号	云量(%)
2000-09-16	Landsat 7 TM	120/38	0.0
2005-10-24	Landsat 5 TM	120/38	0.1
2010-08-19	Landsat 5 TM	120/38	0.09
2017-10-09	Landsat 8 OLI	120/38	0.07

注：研究所采用的社会经济数据主要来源为《南京市统计年鉴》(2001-2018)、《中国城市建设统计年鉴》(2001-2018)、《江苏省统计年鉴》(2001-2018)。

1.3 研究方法

1.3.1 线性光谱分析技术

(1) 线性光谱分析。

城市景观中各类地物对遥感的不同波段的波谱反射率不同，通过假设城市地表的混合像元为植被、高反射率地表、低反射率地表、土壤等4种地物光谱特征的组合，可以实现基于线性光谱混合分析，提取不透水表面指数^[34,35]。线性光谱混合分析之前，对遥感数据需进行辐射定标、大气校正、图像裁剪、波段运算等预处理。线性波谱分析过程主要包括水体掩膜、最小噪声分离、

端元收集、线性光谱分离^[36]。

(2) 结果的修正。

受地物反射率不同的影响，低反射率地物通常为不透水性表面、土壤、植被的组合，本研究引入了建筑物覆盖指数 (NDBI) 和植被覆盖指数 (NDVI) 对根据传统的 LSMA 提取不透水表面结果进行了筛选和修正^[37,38]。

(3) 精度检验。

借助 ArcGIS10.1 软件在研究区内随机生成 200 个点，通过点处理，转换为 300m*300m 的样本区。采用随机抽样的方法选择 50 个样本区，分别计算样本区内 2000、2005、2010、2017 年的像元不透水性表面分析结果的不透水性百分比均值。对照 4 个年度的谷歌高清航拍影像，人工矢量化并测算每个样区的不透水性表面指数均值。对照 4 个年度样本区的不透水性表面分析结果与高清航拍影像人工测算结果，并计算其均方根误差 RMSE、残差项和相关系数 R。

(4) “建设用地”像元提取

利用线性光谱分析技术所提取的不透水性表面指数结果为像元值为 0 到 1 像元，然而自然地表或者农业用地像元中同样会存在少量的不透水性表面，只有不透水性表面占比达到一定的比例时，该像元才可以被认为城市建设用地像元。本研究中以不透水表面变化衡量城市扩张趋势，首先要确定“城市建设用地”像元，通过叠加研究区土地利用类型数据与不透水性表面指数提取结果，最终确定不透水表面指数大于 30%(0.3) 的像元为所需像元。

1.3.2 城市扩张趋势分析方法

(1) 加权平均重力中心分析

地理学中的土地利用重力中心^[39]是土地利用某种属性意义下的“重量”中心，通过不同时间的重心转移路径分析可以反映研究对象整体的空间变化趋势。重力中心已经被广泛的应用到土地覆被变化的空间分析中。本研究中的重力中心是指不透水表面的加权平均重力中心，以每个建设用地像元中不透水面所占的百分比作为指标权重，计算加权重心，可以更加精确的反映研究区不透水面重力中心的空间变化趋势，从而反映城市扩张趋势。加权平均重力中心的坐标计算公式如下：

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{frac}_i x_i}{\sum_{i=1}^n \text{frac}_i} \\ \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{frac}_i y_i}{\sum_{i=1}^n \text{frac}_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中： \bar{x} 和 \bar{y} 是不透水面加权平均中心经纬度坐标； x_i 和 y_i 是不透水面分数图中 i 建设用地像元的经纬度坐标； frac_i 是 i 像元的不透水面百分比值； n 是不透水面分数图的像元总个数。

(2) 线性方向均值分析

在 GIS 中每条线都有一个起点和终点，并有一个方向，而线性方向均值 (Linear Direction Mean, LDM) 则为一组有方向的线的平均趋势线^[40,41]。LDM 多被用来研究不同分布区位的动物迁徙的总体方向，及迁徙距离。本研究中，不透水性指数的平均重心

转移路径，同时具备转移方向和转移距离两属性，可视为向量线，通过研究不同时间跨度的不透水性指数的平均重心转移路径的 LDM 可探究研究区不透水性表面重心转移的平均方向和距离跨度。计算公式如下所示^[41,42]：

$$LDM = \arctan \frac{\sum_{i=1}^n \sin\theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos\theta_i} \quad (2)$$

式中：LDM 为线性方向均值； θ_i 是一组向量线的方向。

计算线性方向均值需要进行额外的象限调整：

$$\sum_{i=1}^n \sin\theta_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \cos\theta_i > 0 = LDM \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sin\theta_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \cos\theta_i < 0 = 180^\circ - LDM \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sin\theta_i < 0, \sum_{i=1}^n \cos\theta_i > 0 = 360^\circ - LDM \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sin\theta_i < 0, \sum_{i=1}^n \cos\theta_i < 0 = 180^\circ - LDM \quad (6)$$

圆方差(指示线方向或方向偏离方向平均值的程度)计算公式为：

$$CV = 1 - \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \sin\theta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \cos\theta_i\right)^2}}{n} \quad (7)$$

(3) 标准差椭圆分析

为了进一步研究城市边缘总体扩张方向和时空发展趋势，开展不透水表面的加权标准偏差椭圆分析(Standard Deviational Ellipse analysis, SDE)^[37,43]。基于不透水表面指数分数图，通过 SDE 分析可以计算加权标准偏差椭圆的 4 个参数包括椭圆中心、长轴、短轴和方位角。椭圆的长半轴表示的是数据分布方向，短半轴表示的数据分布的范围。长短半轴的值差距越大(扁率越大)，表示数据的方向性越明显。而方位角的确定是以 x 轴为准，正北方向为零度，椭圆长轴顺时针旋转的角度，方位角的变化，表示数据方向性的变化程度。具体的计算公式如下所示：

$$\tan\theta = (A+B) / C \quad (8)$$

$$A = \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \bar{y}_i^2 \right) \quad (9)$$

$$B = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \bar{y}_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i \right)^2} \quad (10)$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i \quad (11)$$

$$\begin{cases} \bar{x}_i = x_i - \bar{x} \\ \bar{y}_i = y_i - \bar{y} \end{cases} \quad (12)$$

式中： θ 是椭圆的方位，表明从北向开始顺时针测量的到椭圆长轴的角度； \bar{x}_i 和 \bar{y}_i 是平均中心和 i 像元的中心的偏差值； ω_i 是权重。在本研究中 ω_i 是指 i 像元的不透水面分数值。 X 和 Y 轴方向的标准差根据以下公式计算：

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \bar{x}_i \cos\theta - \omega_i \bar{y}_i \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}} \\ \sigma_y &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \bar{x}_i \sin\theta - \omega_i \bar{y}_i \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

1.3.3 驱动机制分析方法

(1) 偏最小二乘(PLS)回归分析方法原理

王国华等^[44]研究中详细的介绍了 PLS 模型的构建步骤和原理，以及借助数据分析软件 SPSS 的 PLS 集成分析模块进行分析的过程。PLS 优点在于可以排除指标的共线性及样本数量少的问题，在本研究中具有较好的适用性。所以，本研究中采用 SPSS24.0 版本的 PLS 分析模型进行分析研究。

(2) 回归分析自变量(潜在驱动因子)及因变量确定

已有的研究中，对自变量类型划分及指标选取有存在较大差异，但是共同点在于所有指标均可归类于基于统计数据的人口变量、经济变量、生活水平以及政策变量^[4, 24, 26, 29]。所以本研究综合以往研究成果，本着指标认同度高、争议度较大、相关性小、反映信息全面的原则选取 14 个潜在驱动指标(自变量)。以研究区 2000~2017 年的建成区面积统计数据作为因变量，开展 PLS 分析，探究影响城市扩张规模的主要驱动因素。

表 2 城市扩张的潜在驱动指标选取

因变量	自变量类型	自变量	单位
建成区面积	人口变量	单位面积人口密度 (x_1)	人/ km^2
		第二产业从业人员 (x_2)	万人
		第三产业从业人员 (x_3)	万人
	经济变量	单位国土面积地区生产总值 (x_4)	万元/ km^2
		第二产业产值占比 (x_5)	%
		第三产业产值占比 (x_6)	%
		单位面积进口总额密度 (x_7)	万美元/ km^2

		单位面积出口总额密度 (x_8)	万美元/ km^2
生活水平变量		城乡人均可支配收入 (x_9)	元
		城乡人均住房建筑面积 (x_{10})	m^2
政策变量 ^[4]		单位国土面积第二产业固定资产投资 (x_{11})	万元/ km^2
		单位国土面积第三产业固定资产投资 (x_{12})	万元/ km^2
		单位国土面积累积外商投资 (x_{13})	万元/ km^2
		道路面积占辖区土地面积的比例 (x_{14})	%

2 研究结果与分析

2.1 不透水表面指数分析结果及总体特征

对四期的不透水表面提取结果进行精度分析, 其中 $\text{RMSE} \in [0.0053, 0.0092]$, 残差项 $e_b \in [0.0156, 0.0242]$, 相关系数 $R \in [0.876, 0.921]$ 。不透水表面指数提取结果精度较好, 可以满足本研究的需求。

图 1 所示为南京市不透水性表面指数分析结果, 图中的栅格值(30m 精度)大于 0 小于 1, 表示一个栅格单元中不透水性表面所占的比例。由图 1 可以看出 2000 年以来南京市不透水地表呈现逐渐扩张的趋势, 其中 2000 年, 不透水性表面指数高值区主要集中在市中心六区, 其他 5 区仅有少量不透水性指数高值区; 至 2005 年, 浦口区、江宁区 and 市中心六区的的不透水表面指数高值区面积有明显增长, 其他三区未表现出明显增长; 2005~2010 年是江宁区、溧水区不透水表面增长集中区, 不透水表面指数高值区明显增加; 2010 年以来, 随着城镇化进程的加快, 南京市不透水表面表现出整体的快速增长, 特别是浦口、六合区作为新的国家高新技术产业开发区, 建设用地不断增长, 不透水表面指数高值区蔓延式增长。另外, 市中心六区不透水表面也呈东西向不断向外扩张, 溧水区和高淳区的城区及周边也出现大量的不透水表面指数高值区。总体看来, 南京市的城市扩张具有非同步的多点蔓延式扩张特征。

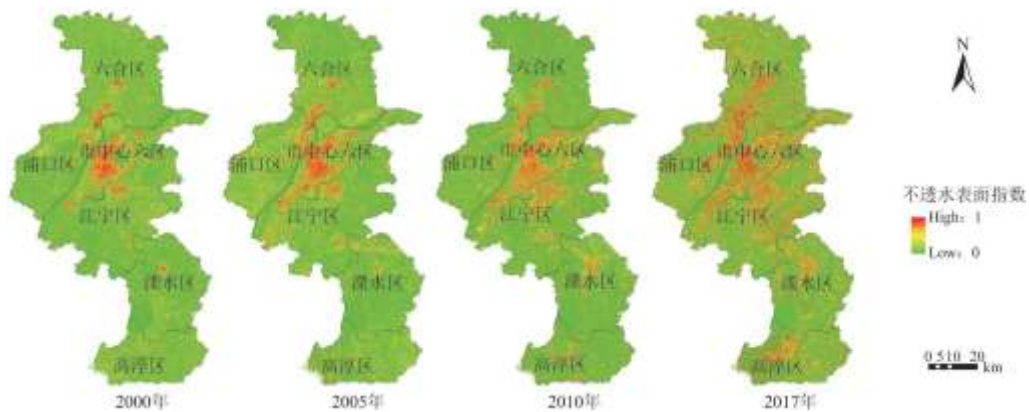


图 1 2000~2017 南京市不透水表面空间分布图

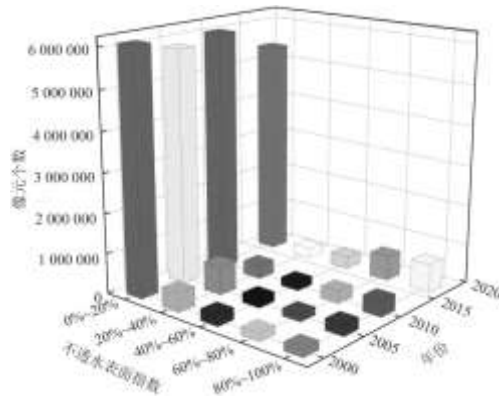


图 2 2000~2017 年不透水性表面像元统计三维立体分布图

为了定量的反映不透水表面面积变化趋势,将不透水表面指数划分为 5 个分值区,分别是 0%~20%, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80%, 80%~100%, 并分别统计 2000、2005、2010、2017 年 4 个年度各不透水表面指数区间的像元个数,以三维柱状图的形式展示图 2。结果显示,研究区不透水表面指数低值像元总体上呈现减少趋势(虽然 2010 年 0%~20%区间的像元有增长,但是高值区间的像元值均呈增长趋势,结果出现异常主要是受不透时期的遥感影像数据地表的植被覆盖情况存在较大差异,导致分析结果产生误差),而高值区间(大于 60%)的像元数呈现明显的增长趋势。2000 年以来,不透水表面高值像元数量的增长反映的城市建设用地扩张。

2.2 城市扩张趋势结果分析

(1) 不透水表面的加权平均重心转移趋势及线性方向均值分析

如果把不透水性表面指数形容为人类活动对自然地表利用的强度,加权平均重心转移表征研究区整体的土地利用强度的转移。以各像元的不透水性表面指数作为指标权重,可以更加合理的反映研究区的不透水性表面重心转移情况。而线性方向均值,反映了各时期不透水表面重心转移的平均方向及转移均值。结合图 3、表 3 可以看出,2000 年以来不透水表面的扩张的速度呈不断增长的状态,4 个年度 3 个时间跨度分别年均转移距离为 303、379、611m,呈现递增状态,这也正是近年来南京市的城镇化进程加快的结果。结合表 4 的线性方向均值分析结果可以进一步得知,研究期内,南京市的不透水性表面加权平均重心整体上往顺时针偏北 259.12° 的方向转移 2564m,城镇化进程导致南京市的自然地表在时空上变化巨大。

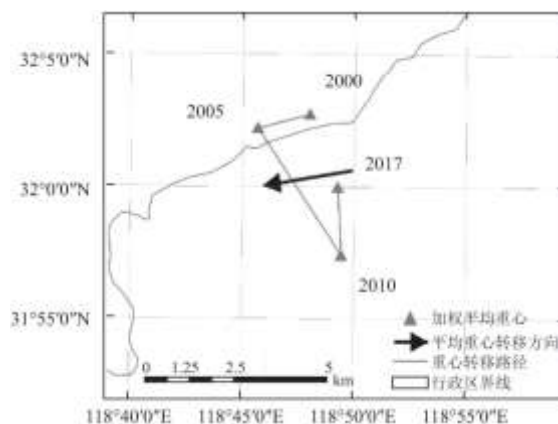


图 3 2000~2017 年南京市不透水表面加权平均重心转移路径示意图

从各辖区的不透水性表面平均重心转移路径看, 各区不透水性表面变化趋势却表现不同。例如, 结合图 4 和表 3 可以看出, 高淳区、溧水区和江宁区在 2000~2005 年、2005~2010 年两期的平均重心转移距离较大, 分别在 400m 以上、632m 以上以及 679m 以上, 而 2010~2017 年重心转移距离明显减少, 分别为 58、55、191m。说明高淳区、溧水区和江宁区的不透水性表面重心转移速度和程度均呈减少趋势。相反, 浦口和市中心六区的平均重心转移距离随时间变化呈不断增长趋势, 如浦口区 2000~2005 年往顺时针偏北 196.77° 的方向转移了 712, 平均每年转移 142m, 而在 2010 到 2017 年之间往顺时针偏北 246.67° 方向转移 2672m, 平均每年转移 382m, 从而说明近年来浦口区建设用地扩张之迅速。六合区较为特别, 2000 年以来, 3 个时期内不透水性表面重心转移距离呈减小状态, 然而, 却依然保持在一个较高的状态, 2000~2005 年, 每年转移 733m, 而 2010~2017 年平均每年转移还达到 572m, 从而说明六合区不透水性表面一直处于快速增长状态。

(2) 不透水表面的标准差椭圆分析

不透水性表面的标准椭圆分析的标准差数级别采用“1_standard_deviation”, 生成的椭圆包含全部数据的 68%。研究区市级及区级的不透水性表面椭圆分析结果如图 5, 图 6, 表 5 所示。

表 3 2000~2017 年南京市(及各区)不透水性表面加权平均重心转移结果

行政区	年份	经度(°)	纬度(°)	顺时针与正北向夹角(°)	转移距离(m)	距离(m)/年
南京市	2000	118.822	31.986	-	-	-
	2005	118.807	31.982	254.58	1517	303
	2010	118.832	31.950	145.23	1893	379
	2017	118.831	31.967	355.64	4280	611
高淳区	2000	118.944	31.329	-	-	-
	2005	118.923	31.326	261.56	2034	407
	2010	118.943	31.331	74.07	2002	400
	2017	118.948	31.332	85.72	409	58
江宁区	2000	118.852	31.897	-	-	-
	2005	118.806	31.877	243.65	4862	972
	2010	118.836	31.894	57.58	3396	679
	2017	118.841	31.883	158.57	1340	191
浦口区	2000	118.625	32.097	-	-	-
	2005	118.623	32.091	196.77	712	142
	2010	118.621	32.086	194.85	558	112
	2017	118.595	32.076	246.67	2672	382

溧水区	2000	119.020	31.605	-	-	-
	2005	119.017	31.646	357.19	4506	901
	2010	119.022	31.618	171.85	3159	632
	2017	119.018	31.616	246.00	384	55
六合区	2000	118.822	32.336	-	-	-
	2005	118.835	32.305	162.41	3664	733
	2010	118.826	32.335	346.49	3397	679
	2017	118.820	32.370	352.32	4001	572
市中心六区	2000	118.805	32.065	-	-	-
	2005	118.800	32.059	211.05	795	159
	2010	118.821	32.067	65.26	2130	426
	2017	118.841	32.082	50.15	2513	359

表 4 2000~2017 年南京市(及各区)不透水性表面加权平均重心转移线性方向均值分析结果

行政区	与正北方向夹角	方向平均值(°) (从正东逆时针方向)	圆方差	经度 (°)	纬度 (°)	平均长度(m)= 平均转移距离
南京市	259.12	190.88	0.84	118.822	31.970	2564
高淳区	78.22	11.78	0.67	118.938	31.329	1482
江宁区	159.51	290.49	0.70	118.829	31.887	3200
溧水区	244.14	205.86	0.70	119.019	31.625	2683
六合区	356.32	93.68	0.66	118.827	32.331	3687
浦口区	212.24	237.76	0.09	118.618	32.088	1314
市中心六区	80.09	9.91	0.61	118.815	32.067	1813

结合图 5 和表 5 可以看出,南京市的不透水表面扩张具有明显的方向性,椭圆的长轴除了在 2000~2005 年有所降低外,其他时期均不断增长,说明整体而言,不透水表面向长轴的两个方向扩张;虽然短轴在各个时期也均不断增长,而椭圆的扁率均在 2.2 以上,表明 Y 轴方向扩张的同时,方向性依然很强。

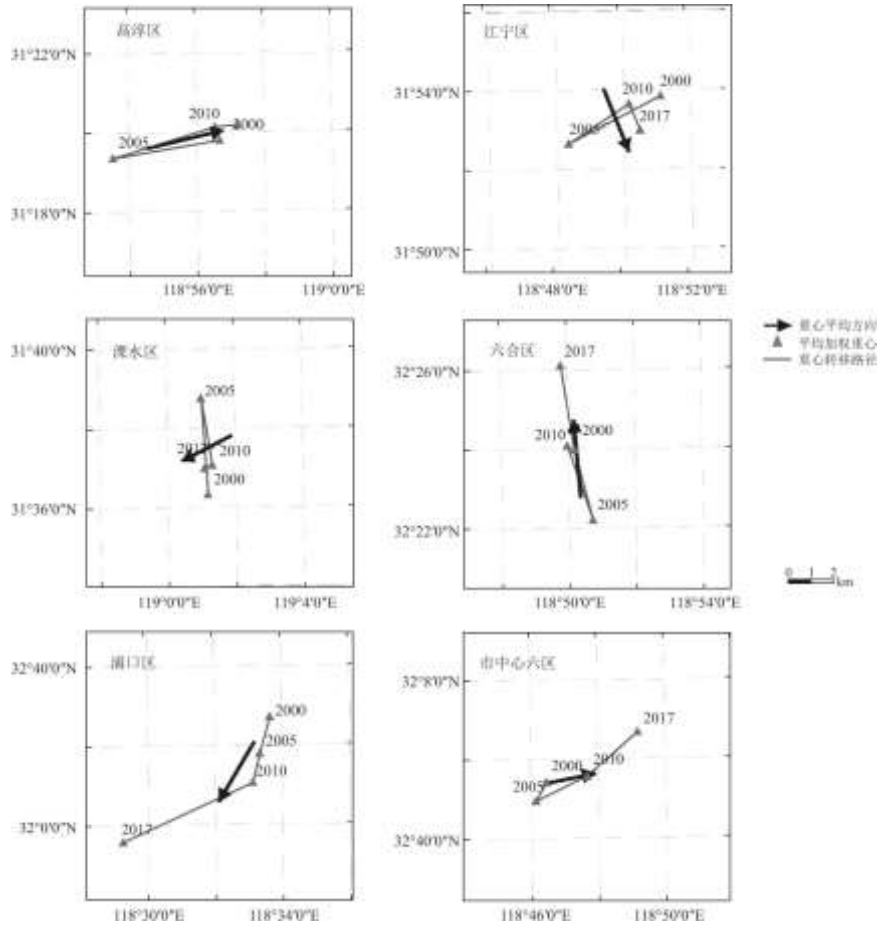


图4 2000~2017年南京市各区不透水性表面加权平均重心转移路径示意图

具体而言，南京市各区的不透水表面的扩张方向性强弱不同。其中市中心六区的方向性最强，四个时期的标准差椭圆扁率均在 2.35 以上，最高值为 2.9，平均值也达到 2.7。其次是浦口区和高淳区，扁率均值分别为 2.26 和 2.25。江宁区的标准差椭圆扁率也相对较高，达到 1.82。方向性最低的为六合区，四期的平均扁率仅为 1.36，2010 年以前，扁率一直处于较低状态，特别是 2005 年椭圆扁率仅仅为 1.18。六合区的不透水面扩张方向性与该区的土地利用状态和发展是紧密相关的，对照该区的航拍影像可以看出，六合区的村庄居民点较多且分布凌乱，城镇地区面积相对较小，城镇化推进较慢，导致其不透水性表面的扩张方向性较差。而近年来，该区标准椭圆扁率也有所提升，至 2017 年其扁率为 1.50，相比 2010 年具有显著的提高。这与南京市近年来大力发展浦口和六合区，积极推进城镇化进程，特别是 2015 年 6 月，六合区又被确立为国家级新区而极大的推动了其发展密切相关。除了六合区，溧水区的标准椭圆扁率也相对较小，平均值仅为 1.48。2000~2010 年其标准椭圆扁率还呈现降低态势。

从椭圆的方位角变化情况看，南京市的不透水表面整体扩张方向变化不大。具体到各辖区，方向性变化最大的六合区，由 2000 年的 2.65° 变化到 2017 年的 156.79° ，其次是浦口区和市中心六区，方位角分别呈现持续性减小和增大，其他各区的方位角未发现明显规律。

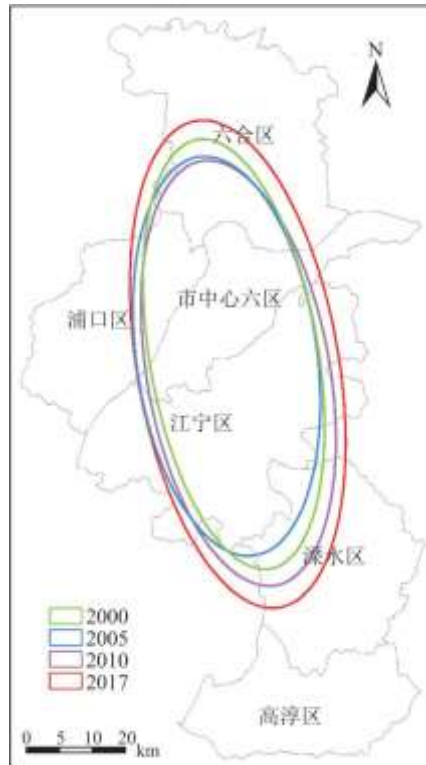


图 5 2000~2017 年南京市不透水表面标准差椭圆分析结果示意图

(3) 城市扩张的社会经济效应

根据不透水表面的重心转移趋势和标准差椭圆分析结果可以看出，南京市不透水表面在整体规模上表现为外围迅速扩张，而方向上表现为整体重心的西南向转移。建设用地的变化与区域经济和社会发展的关系密切，通常表现为相互作用与反馈。以不透水表面扩张的规模和重心转移的角度看其对社会经济发展的影响，一方面表现在城市建设用地总体规模的扩张增加城市空间和承载能力，吸引更多的人口加入到经济建设过程，让经济建设更具活力；另一方面，不透水表面重心的转移主要表现为东部的(市中心六区)仙林副城、麒麟、新港开发区，南部的(市中心六区及江宁区)河西新城、禄口新城、南京南站以及江北的浦口区、六合区国家级新区的建设活动及辐射作用，不透水表面重心的转移促进了区域经济发展和建设，起到了社会经济发展中心转移的作用。

2.3 城市扩张的驱动机制分析结果

2.3.1 影响城市扩张方向的因素分析

(1) 城市外部空间特征及发展战略

由不透水表面的标准差椭圆分析结果可知，南京市的不透水性表面表现出明显的方向性(平均扁率 2.41)，这与南京市整体南北向宽，东西向窄的外部特征有紧密关系。行政区的形态限制了城市扩张宏观尺度的方向，对城市增长起到了约束性作用，同样的现象在区级行政区也表现明显。另外，根据《南京市城市总体规划 2018-2035》，中远期内南京市要实现在长三角层面、都市圈层面、宁镇扬(南京、镇江、扬州)层面领域城市协同发展，以南京市城区为中心，要在东、南、西、北四个方向建设经济发展带，决定了南京市的城市建设在长远规划期内还将继续多向扩张。

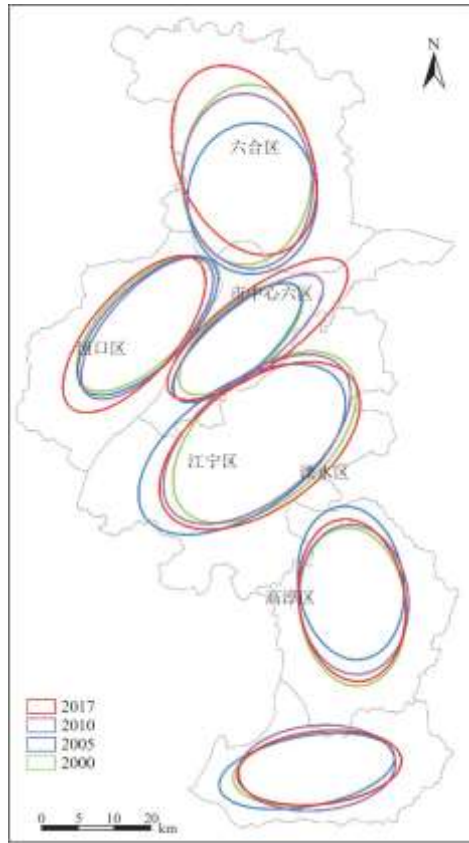


图 6 2000~2017 年南京市各区不透水表面标准差椭圆分析结果示意图

(2) 河流水系

河流水系是影响城市扩张方向的另一主要因素，南京市处长江下游，长江水系贯穿其中，城市临江发展，建设用地依江扩张由来已久。特别是国家实施长江经济带建设宏观战略及南京市国家级新区设立后，长江西岸的浦口区和北岸六合区的沿江区位得到快速的发展，建设用地持续增长。而长江南岸的市中心六区，受发展空间的限制，近年来建设用地往东扩张。

表 5 2000~2017 年南京市(及各区)不透水性表面标准差椭圆分析结果

行政区	年份	X (m)	Y (m)	方位角 (°)	扁率 (长轴/短轴)	扁率均值
南京市	2000	44940	17364	170.394	2.588	2.41
	2005	41552	18620	172.191	2.232	
	2010	44463	18821	170.118	2.362	
	2017	50989	20751	170.268	2.457	
高淳区	2000	6662	15966	82.804	2.397	2.25
	2005	6640	16715	79.407	2.517	

	2010	8053	14743	85.232	1.831	
	2017	6914	15477	83.648	2.238	
江宁区	2000	11751	20568	48.444	1.750	1.82
	2005	11954	22260	54.716	1.862	
	2010	11285	20923	49.826	1.854	
	2017	11949	21520	54.428	1.801	
浦口区	2000	7559	16535	45.050	2.188	2.26
	2005	7568	17032	44.945	2.250	
	2010	7249	16765	41.821	2.313	
	2017	8029	18285	40.713	2.277	
溧水区	2000	15043	9974	173.542	1.508	1.48
	2005	14604	9875	171.57	1.479	
	2010	14188	10264	174.995	1.382	
	2017	15420	9984	172.385	1.544	
六合区	2000	12217	17047	2.646	1.395	1.36
	2005	12136	14277	3.149	1.176	
	2010	16596	12146	174.403	1.366	
	2017	18737	12479	156.793	1.502	
市中心六区	2000	6179	14522	48.561	2.350	2.70
	2005	5876	15416	47.544	2.623	
	2010	5990	17570	50.984	2.933	
	2017	7041	20431	53.488	2.902	

(3) 自然保护区

从南京市的地形地貌图可以看出，南京市是被众多自然保护区(地质公园、湿地公园、森林公园等)所包围，建设用地在“夹缝中”扩张，例如东南向市中心六区内的宝华山森林公园、汤山公园，西北向浦口区内的老山国家森林公园，西南向江宁区的牛首山森林公园等。随着城镇的发展，这种约束力将逐渐改变，建设用地将越过自然保护区继续向外扩张，自然保护区对城市扩张的影响通常表现为初期限制其发展方向，后期被城市建设用地包围而影响力变小。

(4) 土地利用规划

除了自然条件因素外,影响城市扩张趋势的一个重要人文因素为土地利用规划。根据乔伟峰等人对南京市(六合区、浦口区、市中心六区、江宁区)2005~2020年土地利用规划管控建设用地扩张成效的研究结论,2005~2020年新增建设用地规划指标主要集中在“NNE”、“NEE”、“S”、“SW”、“SWW”等方向,2005~2015年研究区的建设用地实际扩张方向主要在“NNE”、“NEE”、“SW”、“NWW”方向,建设用地扩张的实际情况与规划存在一定偏差,但是基本与规划吻合^[45]。对照本研究中西区不透水表面加权平均重心转移路径分析及标准差椭圆分析结果(图4、图6),2005年以来市中心六区主要往东北方向(NEE)扩张,六合区主要往东北及西北(NNE、NWW)方向扩张,浦口区主要是往西南(SW)方向扩张,江宁区2005~2010年往东北方向扩张明显,后期扩张动力不足。可见本研究中的标准差椭圆分析结果也基本与规划结果吻合,从而说明土地利用规划在控制城市扩张方向的作用巨大。规划是对未来社会经济发展产生的土地需求的预测,由于规划期限通常较长,规划难免出现与社会经济发展不匹配的状况,导致规划指标使用进度过快、先建设后修改规划以及规划执行情况累积效果逐年变差等情况严重^[45]。然而,土地利用规划依然是影响城市扩张方向的重要因素。

2.3.2 影响城市扩张规模的因素分析

针对影响城市扩张规模的因素,本研究以选定14个潜在影响因素作为自变量,建成区用地面积作为因变量开展PLS定量分析。模型的参数设置首先以默认值为准(潜在因子个数为5),输出结果中的潜在因子解释方差比例详情如下表6所示。累积变量的方差反映的是潜在因子对变量信息的解释能力,结果显示第一个潜在因子对X的累积方差已经达到0.864,Y的累积方差达到0.974,第二、三个潜在因子对自变量X的累积方差还有较大提升,达到了0.968,但是对Y的累积方差有较小提升。但是从第四个潜在因子开始对X、Y的累积方差提升效果均不再显著,故本研究认为,前三个潜在因子已经能对原变量信息具有较好的解释能力。所以,将原PLS分析模型中的潜在因子的参数设置为3,进行重新分析。

表6 潜在因子解释方差

潜在因子	统计				
	x 方差	累积 x 方差	y 方差	累积 y 方差(R 方)	调整后的 R 方
1	0.861	0.861	0.974	0.974	0.973
2	0.052	0.914	0.007	0.982	0.979
3	0.055	0.968	0.004	0.986	0.983
4	0.007	0.976	0.005	0.991	0.988
5	0.008	0.983	0.001	0.992	0.989

PLS 分析的最终输出结果,第1~2列反映了原始输入数据的回归分析结果,但是该结果不能反映各指标的对因变量的相关关系大小,第3~5列反映了自变量解释潜在因子的作用力度,第6列是标准化数据处理后的变量,第7~9列是标准化处理后的变量对潜在因子的回归结果(第三行是因变量Y关于潜在因子的回归结果,其余的行是潜在因子关于标准化后自变量的线性组合结果),第10~12列是潜在因子的载荷结果。

由7~9列第三行可以得出,因变量Y关于潜在因子的回归结果为:

$$y^* = 0.284t_1 + 0.153t_2 + 0.081t_3 \quad (14)$$

式中： $t_1 = 0.286x_1^* + 0.229x_2^* + 0.278x_3^* \dots\dots + 0.264x_{14}^*$ ； $t_2 = 0.347x_1^* + 0.594x_2^* - 0.298x_3^* \dots\dots + 0.095x_{14}^*$ ； $t_3 = 0.365x_1^* + 0.358x_2^* - 0.051x_3^* \dots\dots + 0.0x_{14}^*$ 。将潜在因子 t_1, t_2, t_3 带入式 14 可以得到：

$$y^* = 0.164x_1 + 0.185x_2 - 0.008x_3 + 0.132x_4 - 0.045x_5 + 0.060x_6 + 0.053x_7 - 0.006x_8 + 0.130x_9 + 0.087x_{10} - 0.065x_{11} + 0.150x_{12} + 0.056x_{13} + 0.090x_{14} \quad (15)$$

式 15 中的标准化自变量的系数即回归系数, 将式 15 中的标准化变量还原为原始变量即可得到原始因变量关于自变量的回归分析结果, 即第 1、2 列结果, 此处不再赘述。

由式 15 可以看出, 14 个自变量中第三产业从业人员 (x_2)、第二产业产值占比 (x_5)、单位面积出口总额密度 (x_8)、单位国土面积第二产业固定资产投资 (x_{11}) 的回归系数为负值。其中, x_5 与 x_{11} 的回归系数绝对值相对较高, 而 x_3 和 x_8 的回归系数绝对值基本接近于零。回归系数绝对值从大到小, 前 5 位的自变量分别为第二产业从业人员 (x_2)、单位面积人口密度 (x_1)、单位国土面积第三产业固定资产投资 (x_{12})、单位国土面积地区生产总值 (x_4)、城乡人均可支配收入 (x_9)。针对主要驱动因素的驱动机制探讨如下:

(1) 人口总量及从业人员的结构 (x_2, x_1)

城镇化的本质是人的城镇化, 南京市作为新一线城市, 受长三角经济圈的影响, 经济活力强, 大量本地人口就地城镇化的同时也吸引了大量的外来人口。2000~2017 年全市常住人口增长 24.92% (135.78 万人)。人口的增长直接加大了对住房、基础设施、公共服务的需求, 从而提高了对建设用地的供地需求, 成为促进城市增长的主要影响因素之一。

第二产业从业人员 (x_2) 对城市扩张的影响最大, 回归系数为 0.185。根据南京市统计数据, 2000~2010 年, 第二产业从业人员数量持续快速增长, 2011~2017 年缓慢增长, 甚至个别年份出现降低趋势。究其原因, 第二产业以加工制造业为主, 从业人员的增加意味着第二产业发展, 从而加大了对工业用地的供地需求, 第二产业对建设用地需求的增加间接体现在了从业人员的增长的指标上。而近年来, 南京市积极推进绿色发展, 在工业用地审批及供应上严格把控, 逐步实现产业转型发展, 导致二产从业人员增速放缓甚至减少。与第二产业从业人员不同, 第三产业从业人员 (x_3) 的变化对城市扩张的影响表现不明显。从产业类型发展特征的角度来分析, 第三产业主要是服务业为主, 与第二产业相比, 相同从业人员密度条件下, 服务业对建设用地的需求量相对较小。换言之, 相同单位建设用地面积可容纳的第三产业从业人员数量更大。2000 年以来南京市第三产业从业人员的数量基本呈现线性增长, 从模型的结果可以看出, 回归系数为 -0.008, 从而表明第三产业从业人员的增长一定程度上对于城市扩张起到了抑制性作用。

(2) 宏观经济发展水平与居民收入水平 (x_4, x_9)

在经济变量和生活水平变量中, 单位国土面积地区生产总值 (x_4) 与城乡人均可支配收入 (x_9) 对建设用地增长的影响力度较大, 而 x_4 和 x_9 各自反映了区域宏观经济发展水平与居民生活水平。以当年度的价格水平 (年鉴实际统计数据) 计算, 2000 年以来南京市人均可支配收入平均以 10.22% 的年均增长速度递增, 而同时地区生产总值以 15.19% 的年均增长速度递增。城乡人均可支

配收入的增长, 直接影响了居民对住房的需求, 导致房地产业对供地的需求增加, 年度递增的房地产开发投资额也说明了这一点。经济总量的提升与建设用地需求增加通常是一个相互影响和反馈的作用过程, 通常经济总量提升促进地区固定资产投资, 加大对建设用地的需求量, 而土地成本的投入刺激经济发展。而从各次产业发展对土地资源的影响来看, 通常第一产业的发展对城市建设用地的增长直接影响较小, 而第二产业及第三产业发展通常需要大量土地成本投入。受南京市近年来产业转型发展的影响, 第二产业产值占比(x_5)不断降低, 其回归系数为-0.045, 说明第二产业的限制性发展对建设用地增长起到一定程度的抑制作用。相反, 第三产业产值占比(x_6)不断增长的情况下, 其回归系数为0.060, 说明对第三产业的鼓励发展促进了城市扩张。两者从宏观经济发展水平的子系统的角度阐释了经济发展建设用地扩张的驱动作用。

在对外贸易方面, 南京市的进出口贸易(x_7 、 x_8)对城市增长虽然具有一定的促进作用, 然而其影响甚微。主要原因是随着产业转型发展, 对外出口的产品附加值的增加, 以及对内进口产品的生产异地化, 对土地资源投入需求量降低。

(3) 产业发展政策(x_{12})

产业固定资产投资结构反映了地区社会经济宏观政策导向。在本研究所选择的四个政策变量中, 单位国土面积第三产业固定资产投资(x_{12})对建设用地变化影响最大, 相比之下, 其他3个变量的影响均较小。从产业发展导向来看, 这主要归因于南京市近年来积极推进产业类型转变, 加大了对第三产业的投资力度, 这其中就包括直接导致建设用地面积增加的房地产开发投资, 直接加大了第三产业用地需求。相反, 第二产业的固定资产投资, 主要用于技术升级、生产条件的改进, 对建设用地的需求变化影响较小。道路面积占辖区土地面积的比例(x_{14})一方面作为固定资产投资的产物, 对建设用地变化的影响主要体现在通过土地利用规划约束建设用地扩张方向, 而对建设用地增长驱动力较小, 另一方面第三产业固定资产投资(x_{12})与道路面积占辖区土地面积的比例(x_{14})两个指标在数据统计上具有相关关系, 存在共线性问题, 从数据分析的角度来讲, 第三产业固定资产投资很大程度上解释了道路面积占辖区面积比例(x_{14})对建设用地面积(Y)的影响, 所以导致其回归系数较小。

城镇化发展以及经济建设的阶段不同, 产业发展水平、产业结构、居民生活水平等均会存在较大的差异, 从而表现出对供地需求的差异。本研究中的研究区代表的是城镇化水平较高的城市, 社会形态、产业结构等与低城镇化水平地区均存在较大的差异, 所以不同地区城市扩张驱动力可能会有所不同。

3 结论

在中国城镇化快速发展的背景下, 建设用地在未来很长一段时间内还将继续扩张。为解决城市扩张趋势及驱动力研究中, 景观类数据的混合像元导致的数据精度降低而无法微观层面研究城市扩张特征问题, 以及驱动力分析中相关研究方法存在缺陷的问题, 本研究基于不透水表面和 PLS 分析开展城市扩张趋势及驱动力分析。研究以具有代表性的快速城镇化城市—南京市为例, 主要研究结论如下:

(1) 基于不透水性表面提取结果统计分析, 2000~2017年南京市空间上表现为多中心非同步的蔓延式扩张。而2000、2005、2010、2017年4个时期, 高度不透水性表面的像元数呈不断增长趋势, 从而说明建设用地总量扩张的同时, 土地利用强度也不断提高。

(2) 受城镇化进程的影响, 2000年以来南京市不透水表面扩张速度呈不断增长状态, 2000~2005, 2005~2010, 2010~2017年3个时间跨度内, 年均不透水面重心转移距离分别为303, 379, 611m。总体看来, 往顺时针偏北 259.12° 方向共转移2564m。具体到各辖区, 不透水表面重心转移距离及方向存在较大差异。

(3) 不透水性表面的标准差椭圆分析结果表明, 南京市的不透水表面扩张具有明显的方向性, 并且在研究时限内没有明显的方向性的变化。具体的各辖区, 市中心六区的不透水性表面扩张方向性最为明显, 其次为浦口、高淳区, 其他各区的方向性较

小。但是就方向性变化程度而言，六合区变化最大，其次为浦口和市中心六区，其他各区方向变化不明显。

(4) 在影响城市建设用地扩张方向的主要因素中，行政区南北长，东西窄的特点，宏观尺度上限制了南京市整体的建设用地扩张方向；长江水系的横穿，带动了长江沿岸的经济发展，加之国家级新区的落成，促进建设用地的沿长江两岸东西向扩张；各类自然保护对建设用地的扩张方向也起到一定的限制，但是这种限制将会随着城镇化的发展逐步变小，后被建设用地包围；土地利用规划作为区域土地利用的纲领性规划，对建设用地扩张方向起到重要影响。

(5) 在影响南京市建设用地扩张规模的因素中，第二产业从业人员总量、单位面积人口密度、单位国土面积第三产业固定资产投资额、单位国土面积地区生产总值、城乡人均可支配收入等 5 项因子的影响力最大。第二产业从业人员增加对建设用地增长具有促进作用，体现在第二产业的发展对工业用地的需求；人口总量的增加加大对住房，基础设施、公共服务需求，促进建设用地增长；受专业转型发展的影响，第三产业固定资产投资导致用地需求增加，成为建设用地增长的核心驱动力之一；城乡人均收入水平的提高加大对住房需求；地区宏观经济发展刺激二三产业的固定资产投资，与用地需求形成相互影响和反馈作用，也成为驱动建设用地增长的主要因素之一。

本研究中仅利用不透水表面提取结果开展了城市扩张的整体趋势分析，有助于宏观尺度了解城市扩张特征，对不同时期的扩张模式，以及微观尺度上不同建设用地类型的扩张模式未进行深入探讨。在进一步的研究中，可以结合相关城市扩张理论如圈层理论，扇形理论等开展扩张模式研究。同时，结合建设用地类型，开展不同用地类型扩张趋势的深入研究。

参考文献:

- [1] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5):789-802.
- [2] 刘涛, 史秋洁, 王雨, 等. 中国城乡建设占用耕地的时空格局及形成机制[J]. 地理研究, 2018, 37(8):1609-1623.
- [3] SALVATI L, ZAMBON I, CHELLI F M, et al. Do spatial patterns of urbanization and land consumption reflect different socioeconomic contexts in Europe?[J] Science of the Total Environment, 2018, 625:722-730.
- [4] 黄宝荣, 张慧智, 宋敦江, 等. 2000~2010 年中国大陆地区建设用地扩张的驱动力分析[J]. 生态学报, 2017, 37(12):4149-4158.
- [5] 刘崇刚, 孙伟, 曹玉红, 等. 大都市区城乡空间边界演化识别方法研究——以南京市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10):2214-2221.
- [6] 刘艳军, 于会胜, 刘德刚, 等. 东北地区建设用地开发强度格局演变的空间分异机制[J]. 地理学报, 2018, 73(5):818-831.
- [7] 王雅竹, 段学军, 杨清可, 等. 近 30 年江苏省建设用地扩张的时空特征、模式与驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7):1531-1540.
- [8] 于溪, 李强, 肖逸雄, 等. 基于 GlobeLand30 的中国城市扩张模式及其对生态用地的影响. 地理与地理信息科学[J], 2018, 34(3):5-12.
- [9] 刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析[J]. 地理学报, 2016, 71(3):355-369.

-
- [10]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):277-291.
- [11]A Y,XU R S.Remote sensing monitoring and driving force analysis of urban expansion in Guangzhou City,China[J].Habitat International,2010,34(2):228-235.
- [12]DEWAN A M,YAMAGUCHI Y.Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960-2005[J].Environ Monit Assess,2009,150(1-4):237-49.
- [13]邹欣怡,赵伟,蒲海霞,等.重庆市南岸区城市边界扩张及生态环境效应研究[J].水土保持研究,2019,26(4):252-258,264.
- [14]PENG J,LIU Y X,SHEN H,et al.Using impervious surfaces to detect urban expansion in Beijing of China in 2000s[J].Chinese Geographical Science,2016,26(2):229-243.
- [15]任鹏飞,甘淑,谢显奇,等.基于 ETM+遥感探测山地城市不透水面及其动态分析[J].水土保持通报,2013,33(5):109-112,160.
- [16]吴溪,郭斌,陈忠升,等.基于 Landsat 影像的环胶州湾不透水面格局演变过程[J].资源科学,2018,40(11):2260-2269.
- [17]LIU Z H,WANG Y L,PENG J,et al.Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change:A case study in Shenzhen[J].Acta Geographica Sinica,2011,66(7):961-971.
- [18]刘珍环,王仰麟,彭建.深圳市不透水表面的遥感监测与时空格局[J].地理研究,2012,31(8):1535-1545.
- [19]张扬,刘艳芳,刘以.武汉市不透水地表时空格局分析[J].地理科学,2017,37(12):1917-1924.
- [20]SEXTON J O,SONG X P,CHENGQUAN HUANG,et al.Urban growth of the Washington,D.C.-Baltimore,MD metropolitan region from 1984 to 2010 by annual Landsat-based estimates of impervious cover[J].Remote Sensing of Environment,2013,129:42-53.
- [21]焦利民,李泽慧,许刚,等.武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式[J].地理学报,2017,72(8):1432-1443.
- [22]葛媛媛,韩磊,赵永华,等.1984-2016年西安市城市扩张时空度量分析[J].生态学杂志,2019,38(5):1491-1499.
- [23]张雪茹,姚亦锋,孔少君,等.南京市 2000~2014 年城市建设用地变化及驱动因子研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(4):552-562.
- [24]车通,罗云建,李成.扬州城市建设用地扩张的时空演变特征及其驱动机制[J].生态学杂志,2019,38(6):1872-1880.
- [25]FANG C L,LI G D,WANG S J.Changing and differentiated urban landscape in China:Spatiotemporal patterns and driving forces[J].Environmental Science & Technology,2016,50(5):2217-2227.

-
- [26]LI G D, LI F. Urban sprawl in China:Differences and socioeconomic drivers[J]. Science of the Total Environment, 2019, 673:367-377.
- [27]熊昌盛, 谭荣, 岳文泽. 快速城市化背景下不同建设用地扩张的驱动差异探讨: 以浙江省义乌市为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12):2124-2135.
- [28]WOID S, ALBANO C, M Dunn, et al. Pattern regression finding and using regularities in multivariate data[M]. London:Analysis Applied Science Publication, 1983.
- [29]张亚利, 游扬声, 刘星. 重庆市沙坪坝区土地利用变化的偏最小二乘驱动机制分析[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(6):89-94.
- [30]杨武, 王玉树. 偏最小二乘回归分析在土地利用变化研究中的应用——以上海市嘉定区为例[J]. 南京农业大学学报, 2005(1):115-120.
- [31]张旸, 周成虎, 戴锦芳, 等. 偏最小二乘回归方法在土地利用结构研究中的应用[J]. 自然资源学报, 2004(6):804-810.
- [32]李琳琳, 张依章, 唐常源, 等. 基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应[J]. 环境科学, 2017, 38(4):1376-1383.
- [33]李逸川, 王海涛, 田淑芳. 基于偏最小二乘回归的投影寻踪耦合模型在土地利用预测中的应用[J]. 中国土地科学, 2010, 24(5):9-12, 31.
- [34]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.
- [35]WU C S, Alan T. Murray. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4):493-505.
- [36]邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010, p. 463. DENG S B. Remote sensing image processing method in ENVI [M]. Beijing, Science Press, 2010, p. 463.
- [37]XU J H, ZHAO Y, ZHONG K W, et al. Measuring spatio-temporal dynamics of impervious surface in Guangzhou, China, from 1988 to 2015, using time-series Landsat imagery[J]. Science of the Total Environment, 2018, 627:264-281.
- [38]XU J H, ZHAO Y, ZHONG K W, et al. Coupling modified linear spectral mixture analysis and soil conservation service curve number (SCS-CN) models to simulate surface runoff:Application to the main urban area of Guangzhou, China[J]. Water, 2016, 8(12):17.
- [39]GAILE G L. Measures of spatial equality in spatial statistics and models[M]. Springer, Dordrecht, 1984:223-233.
- [40]FISHER R A. Dispersion on a sphere proceedings of the royal society of London[J]. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1953, 217(1130):295-305.

[41]KIM I H ,FENG C C ,Y C WANG. A simplified linear feature matching method using decision tree analysis, weighted linear directional mean, and topological relationships[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(5) :1042-1060.

[42]WONG D W S ,J LEE. Statistical analysis of geographic information with ArcView GIS and ArcGIS[M]. Hoboken, NJ:John Wiley & Sons, 2005.

[43]LEFEVER D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse[J]. American Journal of Sociology, 1926, 32(1) :88-94.

[44]王国华, 张虎, 魏岳嵩. 偏最小二乘回归在 SPSS 软件中的实现[J]. 统计与决策, 2017(7) :67-71.

[45]乔伟峰, 吴菊, 戈大专, 等. 快速城市化地区土地利用规划管控建设用地扩张成效评估——以南京市为例[J]. 地理研究, 2019, 38(11) :2666-2680.