

引用格式: Fu Haiyue, Qian Zhiyou, Zhang Yiting, *et al.* Urban Distribution and Its Spatial Determinants from a Multi-scale Perspective in Nanjing City[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1079-1088. [符海月, 钱志友, 张祎婷, 等. 基于多尺度的南京市城市用地分布空间决定因素[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1079-1088.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.5.1079

基于多尺度的南京市城市用地分布空间决定因素

符海月, 钱志友, 张祎婷, 王昭雅, 洪娜娜

(南京农业大学 土地管理学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 影响城市用地分布的因素目前尚无定论, 在多种空间尺度上比较分析城市用地分布空间决定因素对于应对城市蔓延问题有一定现实意义。分析南京市2004~2016年城市用地扩张特征, 而在100 m×100 m、200 m×200 m、300 m×300 m、400 m×400 m、500 m×500 m 5个尺度上, 比较分析城市用地分布潜在的空间决定因素。研究结果表明: 2004~2016年间, 南京市城市扩张速度和强度以2013年为界, 呈先强势增长后缓慢扩张的态势; 在选择的23个空间决定因素中, 13个因素在多数尺度上通过了模型检验。其中, 道路密度、GDP密度、公司工厂、生活服务设施对南京市城市用地分布的影响较大; 其他决定因素对城市用地分布的影响程度表现出一定的尺度效应, 在500 m×500 m较大尺度上, 超市商场、汽车站、医疗则对城市用地分布的影响更大; 而在100 m×100 m更精细尺度上, 银行、学校、汽车站、超市商场对城市用地的分布有较大影响。研究结果可为城市规划及用地调控提供决策支持建议。

关键词: 城市用地分布; 空间决定因素; 多尺度; 空间回归模型; 南京市

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)05-1079-10

1 引言

经济高速发展的同时, 城镇化进程大大加快, 城市规模迅速扩大。树立“紧凑城市”理念, 推动城市发展由外延扩张式向内涵提升式转变势在必行。研究城市用地分布影响因素对于揭示城市用地扩展规律, 制定相关土地调控政策具有重要意义。城市用地扩展是自然、经济社会影响因素综合作用的结果。而短期内, 自然因素比较稳定, 经济社会人类活动对城市扩展的影响远远大于自然因素的影响。当前研究普遍认为经济发展是推动城市扩展的主要原因^[1], 人口、GDP、交通及政策等是城市扩展的主要驱动因素^[2-3]; 城市用地扩展的作用机制主要体现在人口与经济发展、交通设施建设、规划与

区域发展战略引导、体制与制度创新等方面^[4-6]。另外, 土地政策、政府城市规划等导向也是影响城市扩展的重要原因^[7-8], 更强调宏观尺度城市扩展的外在响应。空间影响因素强调地理特征之间的空间依赖性, 侧重于从精细尺度反映对土地利用变化的影响。空间依赖性通常受限于观察尺度, 通常基于不同空间尺度分析影响城市用地分布的空间决定因素^[9-10], 空间统计方法也为分析空间决定因素在一定区域内的空间相关性提供了技术支撑^[11], 城市空间决定因素及其尺度效应成为土地利用变化研究的热点^[12]。在更精细尺度上, 采用格网数据和多种空间模型比较分析城市用地分布空间决定因素及其尺度效应被广为采纳^[13-17], 研究结果对于政府应对城市扩展问题制定政策有一定现实意义^[18-19]。

收稿日期: 2019-07-09; 修订日期: 2020-09-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41871319), 国家留学基金资助项目(201906855021), 南京农业大学公共管理学院教改项目(2020GGJG08)。

作者简介: 符海月(1977—), 女, 甘肃陇南人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用变化、土地资源可持续利用与空间规划方面的研究。
E-mail: fuhaiyue@njau.edu.cn

以上研究表明,在宏观尺度,经济水平、人口、交通和政策等因素对城市扩展的影响,已基本达成共识。而对于更精细尺度,相关空间决定因素被认为与城市用地分布具有因果关系,但影响城市用地分布的空间决定因素比较复杂,还有待进一步识别和挖掘。南京市是中国东部地区重要的中心城市、科研教育基地和综合交通枢纽,长三角辐射带动中西部地区发展的重要门户,也是东部沿海经济带与长江经济带战略交汇的重要节点城市,其城市空间扩展具有一定的典型性和代表性,一直是城市扩展相关研究的热点区域,但当前研究的侧重点主要集中在宏观尺度城市扩展影响机理及城市空间格局的模拟与预测^[20-25]。

基于此,本研究以南京市为研究区,分析南京市2004~2016年城市扩张特征;在多个尺度上,采用不同空间回归模型比较分析城市用地分布的空间决定因素及其尺度效应,试图进一步厘清城市扩展的影响因素及其空间尺度依赖性,以拓展丰富城市扩展驱动机制研究的思路,同时助力“紧凑城市”的发展与建设,为城市规划及用地调控提供决策建议。

2 研究方法

研究采用普通最小二乘回归模型及空间回归模型比较分析南京市城市用地分布与其决定因素的空间响应关系。

2.1 普通最小二乘回归模型(OLS)

普通最小二乘回归模型(OLS)的表达式为式(1),式(1)中, y_i 为被解释变量的估计值, x_i 为解释变量, β 和 β_0 是回归系数。

$$y_i = x_i \beta + \beta_0 \quad (1)$$

2.2 空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)

Anselin 根据解释变量与被解释变量的空间相关性,给出空间回归方程的通用形式:

$$y = \rho W_1 y + X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

$$\varepsilon = \lambda W_2 + \mu \mu \sim N(0, \Omega), \Omega_{ii} = h_i(z\alpha), h_i > 0 \quad (3)$$

其中: y 为被解释变量, X 为解释变量, W_1 为权重矩阵, ρ 为空间滞后系数, β 为解释变量 X 的参数向量, ε 为随机误差项通过式(3)计算。式(3)中, W_2 为权重矩阵, N 为正态分布; Ω 为方差矩阵, Ω_{ii} 为其对角元素, z 为外生变量, α 为常数项, h_i 为函数关系; λ 为 W_2 的系数, μ 为正态分布的随机误差向量。

一般 $0 \leq \rho < 1, 0 \leq \lambda < 1$;参数 ρ, λ, α 的取值决定式(2)的类型。当 $\rho \neq 0, \lambda = 0$ 时,式(2)为空间滞后

模型(SLM),它考虑了被解释变量的空间相关性,即某一空间上的被解释变量不仅与同一空间上的解释变量有关,还与相邻空间的解释变量有关。当 $\rho = 0, \lambda \neq 0$ 时,式(2)为空间误差模型(SEM),假定空间依赖性由于被忽略的变量产生作用时,空间误差模型(SEM)的分析结果更为准确。

2.3 变量的选择与处理

(1)研究单元。研究的基本单元为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 、 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 、 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 、 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 、 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 栅格。以上网格尺度均大于本研究采用的土地利用遥感影像分辨率尺度(30 m),可保证网格内有适量样本进行建模和分析,并能有效反映建模中的尺度效应。

(2)被解释变量。研究采用城市用地利用率(PB)来度量城市用地的变化,故采用城市用地利用率(PB)作为公式(1)和(2)回归模型的被解释变量。城市用地利用率(PB)采用公式(4)计算。式(4)中, Area_{GD} 、 Area_{BL} 分别代表单位格网面积与该格网内的城市用地面积。

$$\text{PB} = \frac{\text{Area}_{\text{BL}}}{\text{Area}_{\text{GD}}} \quad (4)$$

(3)解释变量。近年随着人口和经济的迅速增长,南京市道路、桥梁,城市轨道交通等交通基础设施发展迅猛,学校、银行、餐馆、医院、超市和商业网点等城市生活设施日臻完善,这些城市发展脉络直接影响着城市用地的分布格局。城市兴趣点(POI)是土地自然经济社会属性的综合反映,具有地域代表性,兴趣点是影响城市用地分布的诸因素对该兴趣点所在区域用地格局综合影响的结果,是区域规划与管理政策落实的直接体现。基于此,研究除考虑人口和经济(GDP)两个外生影响因素外,选择与人们生活活密切相关的城市兴趣点(POI)数据等内生因素,来分析其对城市用地分布的空间影响。城市兴趣点可以解释城市用地分布特征,城市兴趣点选取的合理性直接影响到研究结果的客观性。鉴于影响城市分布数据的多维特征和可获取性,本研究共选取人口、GDP、交通、商业、医疗和生活等相关23个空间影响因素作为解释变量,区分为密度变量和邻近变量两组。

密度变量主要包括GDP密度、人口密度、道路密度。GDP密度(Dens_GDP)、人口密度(Dens_Pop)、道路密度(Dens_RD)采用式(5)计算。式(5)中, GDP_{SD} 、 POP_{SD} 和 $\text{Lengrh}_{\text{SD}}$ 分别代表每个格网的GDP、总人口和道路总长度。

$$\begin{aligned} \text{Dens_GDP} &= \frac{\text{GDP}_{\text{SD}}}{\text{Area}_{\text{SD}}} \\ \text{Dens_POP} &= \frac{\text{POP}_{\text{SD}}}{\text{Area}_{\text{SD}}} \\ \text{Dens_RD} &= \frac{\text{Lengrh}_{\text{SD}}}{\text{Area}_{\text{SD}}} \end{aligned} \quad (5)$$

邻近变量选择主干道路、铁路、地铁站、火车站、汽车站、桥梁隧道、政府机构、公共设施、宾馆酒店、餐饮、交通服务设施、学校、银行、医疗、商业大厦、超市商城、公司工厂、公寓小区、生活服务设施、运动休闲设施等 20 个变量。表 1 为 20 个邻近变量的特征描述及其在研究区的分布数量。计算每个格网几何中心到以上邻近变量的最短距离作为此变量在该格网的量值。

2.4 数据来源

(1) 土地利用数据。土地利用数据主要来源于美国 Landsat 卫星影像 TM 与 OLI 数据。研究以 30 m 网格,采用监督分类提取南京市 2004、2007、2010、

2013 和 2016 年土地利用类型(建设用地、耕地、林地、水体、林地及其他用地),并通过混淆矩阵(误差矩阵)进行分类精度评估,总体精度高于 83%,Kappa 系数高于 0.75。Landsat 影像来自美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)网站。

(2) 社会经济数据。相关 GDP、人口统计数据,主要来源于《江苏省统计年鉴》(2005~2017 年)、《南京市统计年鉴》(2005~2017 年)。人口和 GDP 格网数据,来源于全球变化科学研究数据出版系统的 1 km×1 km 的中国公里网格人口分布数据集和中国公里网格 GDP 分布数据集。

(3) 空间要素矢量数据。研究所需的南京市交通矢量数据以及城市兴趣点数据(POI),如银行、宾馆酒店、超市商场、公园、政府机构、停车场、餐饮、学校、药店、医院、地铁站、收费站以及生活设施等数据,主要来源于百度地图与高德地图(2013 年)城市兴趣点(POI)开源信息。

表 1 邻近空间变量的特征描述及数量

Table 1 Description of spatial variables and their feature type and number

ID	变量	类型	数量(条、个)	特征描述
1	主干道路	Line	13	主干道路
2	铁路	Line	8	铁路
3	地铁站	Point	54	地铁站
4	火车站	Point	5	南京站、南京南、南京西、仙林站、南京龙潭
5	汽车站	Point	10	汽车站
6	桥梁隧道	Point	296	桥梁、隧道
7	政府机构	Point	744	各种政府机构、工商、地税、办事处等驻地
8	公共设施	Point	1 166	公园、公共绿地、公共厕所
9	宾馆酒店	Point	1 268	各类宾馆、酒店、招待所
10	餐饮	Point	3 611	各类餐饮店
11	交通服务设施	Point	7 514	停车场、出租车站、公交车站、加油站、收费站
12	学校	Point	1 321	小学、中学、大学
13	银行	Point	2 116	各类银行
14	医疗	Point	1 796	医院、诊所、药店
15	商业大厦	Point	447	各类商业大厦(办公、商用场所)
16	超市商城	Point	4 206	超市、商城、便利店
17	公司工厂	Point	4 597	各种公司和各类工厂驻地
18	公寓小区	Point	1 972	居住类的公寓小区
19	生活服务设施	Point	1 879	理发店、修理店、干洗店等
20	运动休闲设施	Point	1 450	运动场、KTV、影城、网咖、洗浴等

3 结果分析

3.1 南京市城市用地扩张时空演化特征分析

南京市位于 31°14′~32°36′ N、118°22′~119°14′ E 之间,属北亚热带季风气候,四季分明,年

均气温 16℃,年均降雨量为 1 106.5 mm。近年来,南京市城市发展迅速,GDP 总量由 2004 年的 1 576.33 亿元增长至 2016 年的 9 720.77 亿元;常住人口由 572.23 万人增长至 823.59 万人,城镇化率从 31.6% 增至 82%。随着南京市经济社会的快速发

展和城镇化的快速推进,城市发展对土地的需求不断增加。图1为南京市2004、2007、2010、2013和2016年土地利用类型遥感解译图。

2004~2016年期间南京市建设用地面积加剧扩张,耕地面积逐年减少,林地面积缓慢下降,水体波动减少但变化并不显著;建城区面积由2004年的872.2 km²增长到2016年的1 717.4 km²,占总面积比例也从13.2%增长到26.0%,年均增长速度5.8%。近10 a南京市中心城区主要的城市扩张方向为城市东北部、城市南部以及拥江发展的东南部3个区域,整体经历了从中心重点填充至外围轮廓扩张的演变过程。2004~2007年南京市城市扩展速度为4.6%,2007~2013年为6.7%,2013~2016年为5.1%,城市

扩张速度有所减缓。而2004~2013年城市扩展强度高达1.4;2013年以后,城市扩张强度随有所下降,但南京市城市建城区规模任然在持续加大。城市蔓延指数(SI)>1,表示城市增长速度快于人口增长速度,表明城市处于蔓延状态,SI值越高,表明蔓延程度越高。2004~2007年期间南京市SI值为1.32,2007~2010年期间SI值增长到2.5,在2010~2013年期间SI值高达10.2,2013~2016年期间,SI值有所回落为7.3。总体来看,2004~2016年期间南京市的SI值均大于1,南京市城市空间扩展一直处于蔓延状态,且城市蔓延程度在加剧。南京市建设用地的迅猛扩张以及有限的人口消纳能力势必会进一步激化人地矛盾。

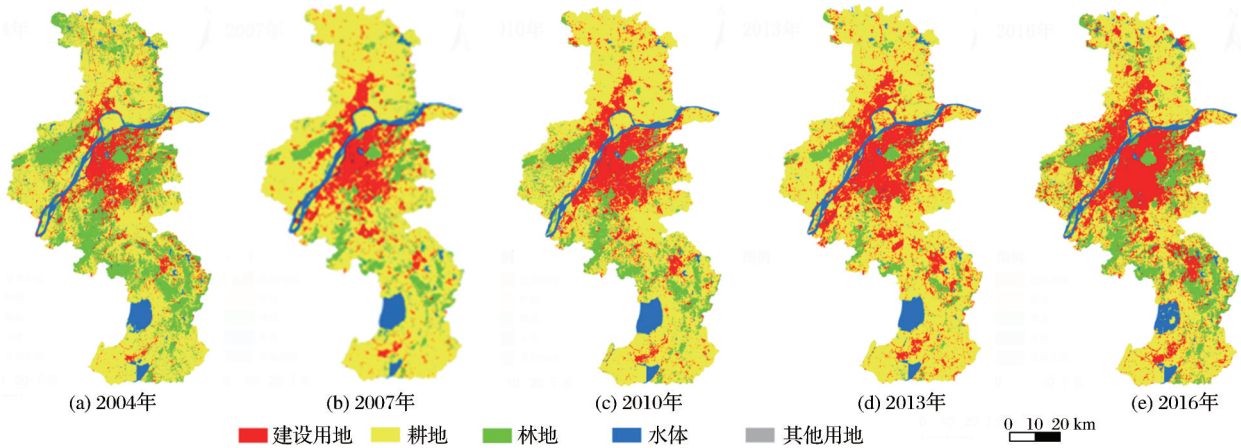


图1 2004~2016年南京市土地利用变化图

Fig.1 Land use classification map in Nanjing city from 2004 to 2016

3.2 城市用地分布多尺度空间自相关分析

以上分析表明,2013年为近十年南京市城市土地利用扩张速度变化的转折点。南京市长江以南市辖区(不包括溧水区与高淳区),城市建设用地集中连片,在解释城市用地分布的空间影响因素方面有一定代表性。该区土地总面积2 350.42 km²,占南京市总面积的35.7%,区域经济发展迅速,人口日渐膨胀,交通等基础设施日臻完善,建成区面积由2014年的534.2 km²扩展到2016年的897.3 km²。因此,本研究以南京市长江南市辖区为研究范围(图2),并以2013年土地利用截面数据为样本,在100 m×100 m、200 m×200 m、300 m×300 m、400 m×400 m、500 m×500 m 5个尺度上,分析城市用地空间分布决定因素。

研究根据式(4)分别计算在5个尺度下南京市的城市用地率。图3为研究区在500 m×500 m尺度下的城市用利用率(PB)分布图。

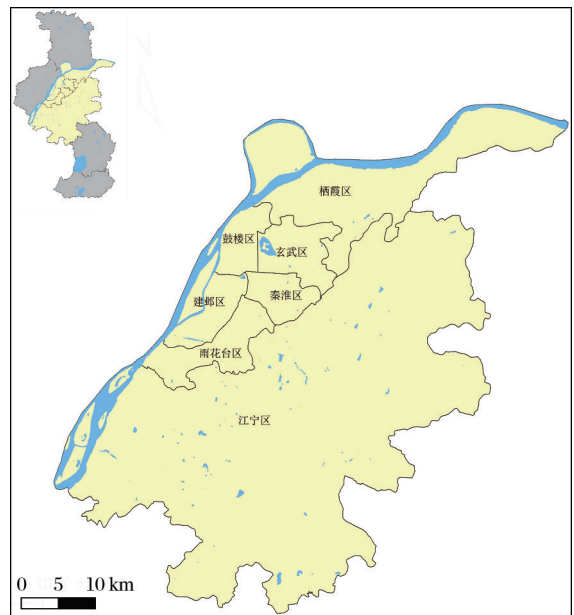


图2 研究范围示意图

Fig.2 Research area

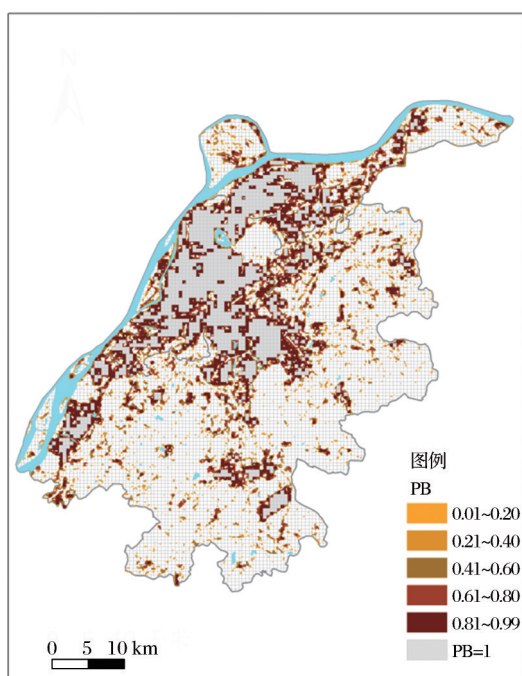


图3 城市用地利用率(PB)分布图(500 m×500 m)

Fig.3 The distribution of urban utilization rate (PB)

采用Moran's I指数,分别分析在5个尺度下南京市城市用地利用率(PB)的空间自相关特征。在计算5个空间尺度下城市用地利用率(PB)的Moran's I指数时,为确保每个格网至少有一个邻居,2 000 m到6 500 m之间均设置了500 m间隔的滞后距离。图4为城市用地利用率(PB)在100 m×100 m、200 m×200 m、300 m×300 m、400 m×400 m、500 m×500 m尺度上的Moran's I变化图。图4表明城市用地利用率(PB)在5个尺度上表现出很强的空间相关性,并随着距离的增加,空间自相关逐渐减弱,符合地理学第一定律。在500 m×500 m尺度上Moran's I值最大,并随着空间尺度的增大逐渐减小,至100 m×100 m降到最小。城市用地的自相关性在更大尺度上Moran's I值更高,表明城市扩张更多为区域化模式。

3.3 城市用地分布与空间决定因素的多尺度相关分析

研究采用皮尔森相关分析,分析城市用地分布与空间决定因素的关联特征。表2为研究区域用地利用率(PB)在覆盖城市用地区域的不同的尺度上与空间影响因素的皮尔森相关系数。

对于密度变量,人口密度、GDP密度、道路密度在所有的空间尺度上均与城市用地呈显著正相关,并且随着尺度的增大,相关系数也增大,且绝大部分在0.3以上, R^2 值最大的是尺度为500 m×500 m

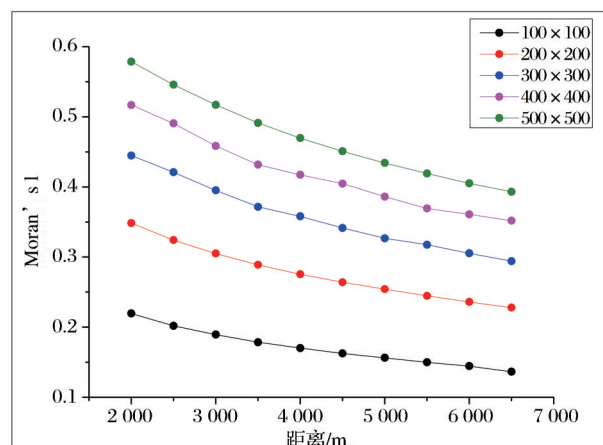


图4 不同尺度城市用地利用率(PB)空间分布Moran's I变化图

Fig.4 Moran's I of the spatial distribution of urban utilization rate (PB) at five spatial scales

下的道路密度,高达0.66。

邻近变量均与城市用地分布呈负相关。对于邻近类型的影响因素在5个尺度上均与城市用地呈负相关,说明距离这些影响因素距离越近对城市用地的影响越大,距离越远对城市用地的影响越小,符合常理推断。从 R^2 值来看,随着尺度的增大, R^2 不断增大,表明相关性和尺度有密切的关系。最大值为在500 m×500 m尺度下的银行,其次是在相同尺度下的生活服务设施和政府机构,这些因素可能对城市用地的分布有很大影响。

此外,铁路、桥梁隧道和主干道路这3个影响因素的 R^2 值在大多数情况下都低于0.3,且随着尺度的增长变化也不是特别明显。因此,以下研究将这3个影响因素剔除。

3.4 城市用地分布与空间决定因素的多尺度回归结果分析

在100 m×100 m、200 m×200 m、300 m×300 m、400 m×400 m、500 m×500 m 5个尺度上,以城市用地利用率(PB)为被解释变量,GDP密度、人口密度、道路密度及到地铁站、火车站、汽车站、政府机构、公共设施、宾馆酒店、餐饮、交通服务设施、学校、银行、医疗、商业大厦、超市商城、公司工厂、公寓小区、生活服务设施、运动休闲设施的距离为解释变量,采用式(1)~(3)分别进行最小二乘回归模型(OLS)、空间滞后模型(SLM)以及空间误差模型(SEM)分析。

3.4.1 不同回归模型效用分析

表3为3种模型在5个尺度上的 R^2 、AIC、LIK、

表 2 不同尺度下 PB 与解释变量的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between PB and the independent variables at five spatial scales							
变量	类型	描述	100 m×100 m	200 m×200 m	300 m×300 m	400 m×400 m	500 m×500 m
Dens_POP	密度	人口密度	0.29	0.38	0.45	0.49	0.52
Dens_GDP	密度	GDP 密度	0.32	0.42	0.49	0.54	0.57
Dens_RD	密度	道路密度	0.30	0.43	0.53	0.61	0.66
Dist_ZGDL	邻近	到主干道路的距离	-0.16	-0.20	-0.23	-0.24	-0.26
Dist_TL	邻近	到铁路的距离	-0.21	-0.25	-0.26	-0.29	-0.31
Dist_DTZ	邻近	到地铁站的距离	-0.27	-0.35	-0.40	-0.43	-0.45
Dist_HCZ	邻近	到火车站的距离	-0.27	-0.35	-0.40	-0.43	-0.46
Dist_QCZ	邻近	到汽车站的距离	-0.26	-0.33	-0.39	-0.41	-0.44
Dist_QLSD	邻近	到桥梁隧道的距离	-0.15	-0.19	-0.21	-0.23	-0.23
Dist_ZFJG	邻近	到政府机构的距离	-0.33	-0.41	-0.47	-0.49	-0.52
Dist_GGSS	邻近	到公共设施的距離	-0.25	-0.31	-0.36	-0.38	-0.40
Dist_BGJD	邻近	到宾馆酒店的距离	-0.30	-0.37	-0.43	-0.45	-0.48
Dist_CY	邻近	到餐饮的距离	-0.31	-0.38	-0.43	-0.46	-0.48
Dist_JTFWSS	邻近	到交通服务设施的距离	-0.29	-0.36	-0.40	-0.42	-0.44
Dist_XX	邻近	到学校的距离	-0.25	-0.31	-0.36	-0.39	-0.40
Dist_YH	邻近	到银行的距离	-0.35	-0.43	-0.49	-0.52	-0.54
Dist_YL	邻近	到医疗的距离	-0.25	-0.32	-0.35	-0.38	-0.39
Dist_SYDS	邻近	到商业大厦的距离	-0.27	-0.34	-0.39	-0.42	-0.44
Dist_CSSC	邻近	到超市商城的距离	-0.30	-0.39	-0.44	-0.47	-0.49
Dist_GSGC	邻近	到公司工厂的距离	-0.26	-0.33	-0.37	-0.40	-0.41
Dist_GYXQ	邻近	到公寓小区的距离	-0.30	-0.37	-0.42	-0.45	-0.47
Dist_SHFWSS	邻近	到生活服务设施的距离	-0.34	-0.43	-0.49	-0.51	-0.54
Dist_YDXXSS	邻近	到运动休闲设施的距离	-0.32	-0.40	-0.45	-0.48	-0.51

SC 值。回归模型结果表明:首先,在解释影响城市用地的空间分布决定因素方面,由于解释变量的空间依赖性空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)的 R^2 值在 5 个尺度上都远高于最小二乘回归模型(OLS)的 R^2 ,空间回归模型的 AIC 和 SC 值也更小。其次,空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)的 R^2 值随着空间尺度的增大而增大,从 100 m×100 m 尺度到 500 m×500 m 尺度 R^2 增大近一倍,表明一些因素的影响作用只能在更小的尺度上检测到,在较大尺度上则会模糊。这与 Veldkamp 等^[11]的研究结果得到相互印证。最后,在 5 个空间尺度上,空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)对变量的统计检验结果虽基本一致,但空间滞后模型(SLM)的 R^2 值更大且 AIC 和 SC 值更小,空间滞后模型(SLM)的性能略优于空间误差模型(SEM)。

3.4.2 空间决定因素尺度效应分析

通过 5 个尺度下回归模型的有效性检验来进一步分析 20 个因素的空间依耐性。表 4 为最小二乘回归模型(OLS)、空间滞后模型(SLM)和空间误差

模型(SEM)的显著性 P 值在置信水平 0.01(XX)和 0.05(X)的回归结果。在 5 个尺度下,GDP 密度、道路密度及到汽车站、公共设施、学校、超市商城、公司工厂、公寓小区、生活服务设施的距离通过了 3 个模型在置信度水平 0.01 和 0.05 下的显著性检验。其中,GDP 密度、道路密度及到汽车站、公共设施、交通服务设施的距离对城市用地分布的影响具有正向效应;而到学校、医疗、超市商城、公司工厂、公寓小区、生活服务设施的距离则对城市用地的分布具有负向效应;到宾馆酒店、运动休闲设施的距离没有通过 3 种模型的置信度检验。

在 100 m×100 m、200 m×200 m 较小尺度上,到地铁站、火车站、政府机构、餐饮的距离对城市用地分布的影响均表现出一定的显著性。其中,到地铁站、火车站、政府机构的距离对城市用地分布的影响有着负向效应。而在 400 m×400 m、500 m×500 m 较大尺度上以上邻近变量对城市用地分布的影响均没有通过模型的显著性检验。而人口密度及到交通服务设施、银行、商业大厦,医疗等距离对于城市用地分布的影响对于不同的回归模型的显

表 3 不同尺度下 OLS、SLM 和 SEM 回归模型的 R^2 、AIC、LIK、SC 值

Table 3 R^2 , AIC, LIK, and SC of OLS, SLM and SEM at different spatial scales

参数 尺度	R^2			AIC			LIK			SC		
	OLS	SLM	SEM	OLS	SLM	SEM	OLS	SLM	SEM	OLS	SLM	SEM
100*100	0.19	0.35	0.35	43174	26144	26280	-21566	-13050	-13119	43375	26355	26480
200*200	0.33	0.43	0.42	15437	11232	11411	-7698	-5594	-5684	15613	11415	11586
300*300	0.44	0.53	0.52	6060	3607	3806	-3009	-1782	-1882	6221	3776	3967
400*400	0.51	0.60	0.60	2291	681	797	-1124	-319	-377.	2442	839	948
500*500	0.59	0.67	0.66	252	-936	-872	-105	490	457	395	-785	-729

注:其中空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)使用了1阶邻接矩阵

表 4 不同空间尺度下 SLM 和 SEM 模型解释变量的显著性

Table 4 Independent variables significant level in SLM and SEM at different spatial scales

尺度 变量	100 m×100 m			200 m×200 m			300 m×300 m			400 m×400 m			500 m×500 m		
	OLS	SLM	SEM	OLS	SLM	SEM	OLS	SLM	SEM	LS	SLM	SEM	OLS	SLM	SEM
Dens_POP	XX(+)	XX(-)	XX(+)	XX(+)	XX(-)	XX(+)	XX(+)	XX(-)	XX(+)	XX(+)	—	XX(+)	—	XX(-)	—
Dens_GDP	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)
Dens_RD	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)
Dist_DTZ	XX(-)	X(-)	X(-)	X(-)	—	X(-)	X(-)	—	—	X(-)	—	—	—	—	—
Dist_HCZ	XX(-)	X(-)	—	X(-)	—	—	—	—	—	—	—	—	X(-)	—	—
Dist_QCZ	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	X(+)	X(+)
Dist_ZFJG	XX(-)	—	X(-)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dist_GGSS	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	X(+)	X(+)	X(+)
Dist_BGJD	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dist_CY	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	X(+)	X(+)	X(+)	—	—	—	—	—	—	—	—
Dist_JTFWSS	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	X(+)	X(+)	X(+)	—	—
Dist_XX	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)
Dist_YH	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	X(-)	XX(-)	XX(-)	—	—	XX(-)	—	—
Dist_YL	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	—	X(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	XX(+)	X(+)	—	XX(+)	XX(+)	XX(+)
Dist_SYDS	XX(-)	XX(-)	XX(-)	X(-)	—	X(-)	—	—	—	X(+)	—	—	X(+)	—	X(-)
Dist_CSSC	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)
Dist_GSGC	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)
Dist_GYXQ	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	X(-)	XX(-)
Dist_SHFWSS	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)	XX(-)
Dist_YDXXSS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注:“XX”代表0.01显著性水平下,“X”代表0.05显著性水平下,“+”代表正相关,“-”代表负相关;“—”表示不显著

著性检验结果有一定差异,在较大尺度上对模型具有一定敏感性。如:对人口密度,分别在400 m×400 m、500 m×500 m较大尺度,对城市用地分布的影响没有通过空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)的显著性检验。交通服到服务设施的距离对城市用地分布的影响在500 m×500 m尺度没有通过空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)的显著性检验。到银行的距离在400 m×400 m、500 m×500 m较大尺度上均没用通过空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)的显著性检验,表明这些因素在中大尺度上,表现出一定模型依赖性。而到医疗和商业大厦的距离对城市用

地分布的影响,虽表现出一定的模型依赖性,但尺度效应不明显。同时说明,空间回归模型有也具有一定空间尺度依赖性,适合较小空间尺度城市用地分布的决定因素分析。

进一步选择在多数尺度通过多元回归模型检验的空间影响变量(显著性检验p值小于0.05),即:人口密度、GDP密度、道路密度及到汽车站、公共设施、交通服务设施、学校、银行、医疗、超市商城、公司工厂、公寓小区、生活服务设施的距离等13个变量,分析其对城市用地分布的影响程度。图5为5个尺度下,采用3种模型进行13个因素对城市用地分布影响的三维分析图。 z 轴代表空间回归系数, x

轴代表不同的模型(OLS、SLM、SEM),y轴代表5个不同尺度。

图5表明,在密度变量中,道路密度和GDP密度对城市用地分布的影响最大。在 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 、 $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 、 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 尺度上,对于空间滞后模型(SLM),道路密度和GDP密度对城市用地分布的影响系数分别达到0.53和0.143、1.12和0.27、1.09和1.23;对于空间误差模型(SEM),道路密度和GDP密度对城市用地分布的影响系数分别为0.59和0.30、1.19和0.44、1.23和0.51,随尺度增大有增大趋势。

在邻近变量中,公司工厂、生活服务设施是影响城市用地分布影响最大,在 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 、 $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 、 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 尺度上,对于空间滞后模型(SLM),公司工厂和生活服务设施对城市用

地分布的影响系数分别达到-0.16和-0.11、-0.28和-0.17、-0.26和-0.13;对于空间误差模型(SEM),公司工厂和生活服务设施对城市用地分布的影响系数分别达到-0.41和-0.24、-0.47和-0.28、-0.42和-0.23。而其他因素对城市用地分布的影响程度表现出一定的尺度效应,在 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 较小尺度上,距银行、学校、汽车站、超市商场的距离,对城市用地的分布有更大影响。对于空间滞后模型,系数分别达到了0.10、0.09、0.080、0.079;对于空间误差模型,系数分别达到了0.252、0.199、0.204、0.203。而在 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 较大尺度上,超市商场、学校、汽车站、医疗则对城市用地分布的影响更大,对于空间滞后模型,系数分别为0.113、0.107、0.100、0.083;对于空间误差模型,系数分别为0.21、0.15、0.18、0.14。

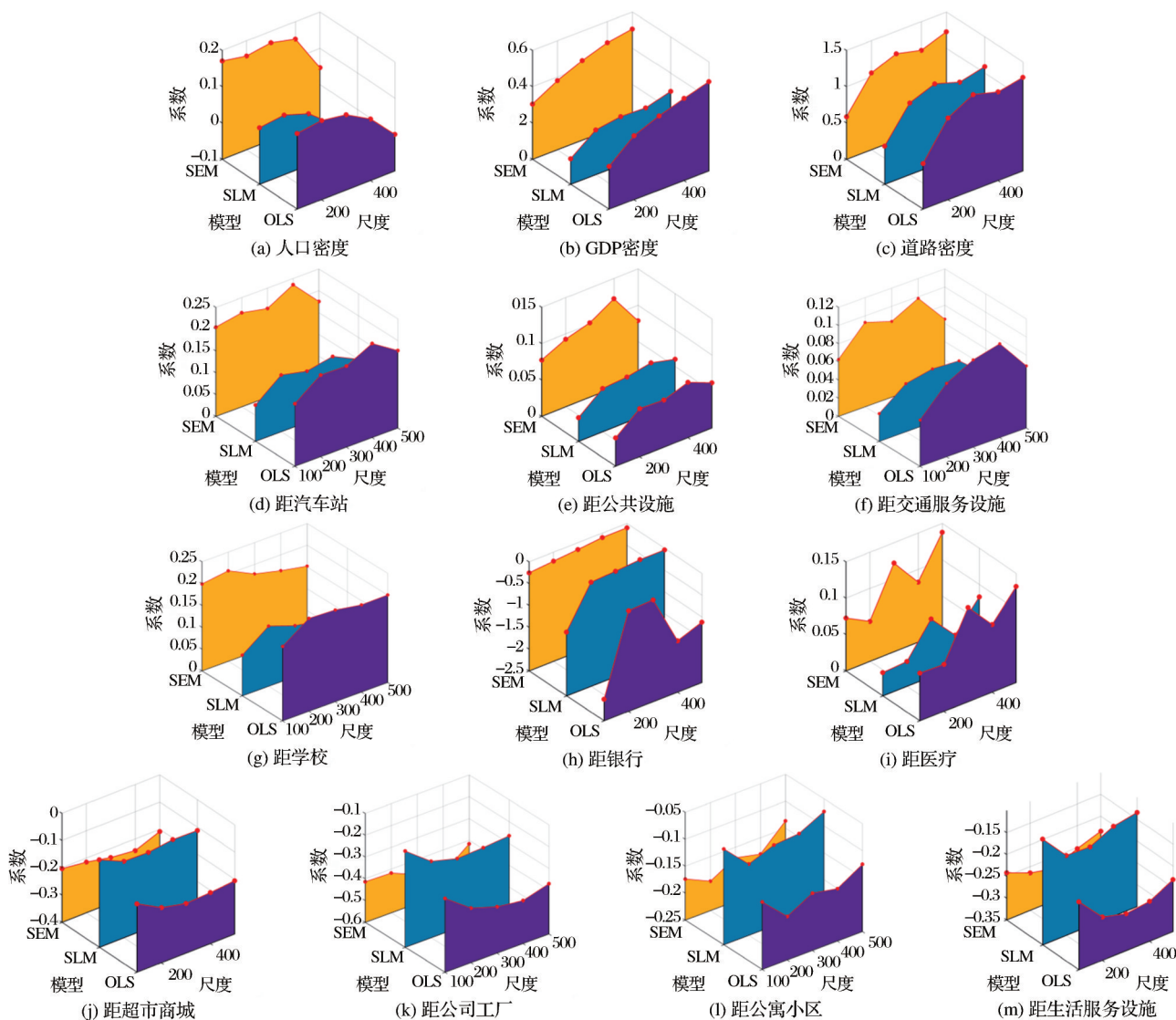


图5 空间决定因素在不同尺度下采用三种模型的回归系数

Fig.5 Regression coefficients of spatial determinants for three models at different scales

4 讨论

位于交通便利的工作场所(道路、公司、工厂)以及购物场所(超市商城),其附近的城市用地利用率越高。南京市道路密度和GDP密度与城市用地分布关联密切,这与其他相关研究^[22,29-31]得出的结论一致。但本研究表明人口密度对南京市城市用地分布的影响作用并不大,是否能够说明在精细尺度下人口对城市用地分布并没有显著影响,还需进一步商榷。距离公司办公室、工厂距离越近,其城市用地比率越高,这与办公场所和工厂存在大量定期访问的城市居民相关。距离超市商城、银行越近城市用地分布越广,土地价格一般也越高,从此意义看,研究结论符合土地经济学一般原理;而距离学校和汽车站愈远,城市用地利用率更高的原因可能是义务教育的知名中小学多聚集在市中心。

南京市铁路、火车站、桥梁隧道、地铁站、餐饮、政府机构、宾馆酒店、商业大厦、运动休闲设施与城市用地空间分布没有显著关系。火车站位于南京市核心地带已经建成多年,铁路线路同样也已形成多年对城市用地的分布也没较大影响^[13];扬子江的桥梁和隧道是武汉市东西交通要道,在城市扩张中起着至关重要的作用。但本研究表明,296个桥梁隧道并没有对南京市的城市用地分布有显著影响;地铁站的距离与城市用地分布相关性也不高,原因可能是研究的时间节点是2013年,当时南京市已建成的地铁线路只有两条,而其周边城市用地在规划地铁时就已形成。

影响城市用地分布的空间因素在不同的尺度下有所不同,同一因素也表现出一定尺度效应。因此,在确定影响城市用地分布的主要空间决定因素时,有必要同时厘清其影响程度。此外,政策因素(如城市规划、城市发展重点等)主要在宏观尺度上影响城市扩展的方向,如何影响城市内部用地空间布局还需进一步商榷。

5 结论

研究以南京市为研究区,选择23个潜在的城市用地分布空间影响因素,在100 m×100 m、200 m×200 m、300 m×300 m、400 m×400 m、500 m×500 m 5个尺度上,采用空间回归模型比较分析精细尺度城市用地分布的空间决定因素,主要得出以下结论:

(1)2004~2016年,南京市城市扩张速度和强

度呈现先强势增长后缓慢扩张的态势,且城市空间增长区域差异明显。南京市城市建设用地扩张速度和强度以2013年为界呈现先强势增长后缓慢扩张态势。从各行政区来看,南京市城区外围的江宁区、六合区、浦口区的城市面积增长速度迅速,是南京市在2004~2010年期间建城区扩张最大的3个行政区。

(2)在选择23个决定因素中,道路密度、GDP密度、人口密度及到生活服务设施、公司工厂、汽车站、公共设施、学校、超市商城、公寓小区、交通服务设施、银行、医疗的距离等13个因素对城市用地分布的影响,在多数尺度上通过了模型检验。其中,GDP密度、道路密度、人口密度及到汽车站、公共设施、交通服务设施、学校、医疗机构的距离对城市用地的分布具有正向影响效应;而到银行、超市商城、公司工厂、公寓小区、生活服务设施的距离对城市用地分布的影响具有负向效应。

(3)在通过模型检验的13个空间决定因素中,密度变量、道路密度和GDP密度对城市用地分布的影响较大;在邻近变量中,公司工厂、生活服务设施对城市用地分布的影响最大。其他因素对城市用地分布的影响程度表现出一定的尺度效应,在100 m×100 m较小尺度上,银行、学校、汽车站、超市商场对城市用地的分布有较大影响;在500 m×500 m较大尺度上,超市商场、学校、汽车站、医疗则对城市用地分布的影响更大。

参考文献(References):

- [1] He C F, Huang Z J, Wang R. Land Use Change and Economic Growth in Urban China: A Structural Equation Analysis [J]. *Urban Studies*, 2014, 51(13): 2880-2898. doi: 10.1177/0042098013513649.
- [2] Chen J F, Chang K T, Karacsonyi D, et al. Comparing Urban Land Expansion and Its Driving Factors in Shenzhen and Dongguan China [J]. *Habitat International*, 2014, 43(3): 61-71. doi: 10.1016/j.habitatint.2014.01.004.
- [3] Xiao J Y, Shen Y J, Ge J F, et al. Evaluating Urban Expansion and Land Use Change in Shijiazhuang, China, by Using GIS and Remote Sensing [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 75(1): 69-80. doi: 10.1016/j.landurbplan.2004.12.005.
- [4] Zhou Guohua, He Yanhua. Characteristics and Influencing Factors of Urban Land Expansion in Changsha [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1171-1180. [周国华, 贺艳华. 长沙城市土地扩张特征及影响因素[J]. *地理学报*, 2006, 61(11): 1171-1180.]
- [5] Che Tong, Li Cheng, Luo Yunjian. Changes in Landscape

- Pattern of Built-up Land and Its Driving Factors during Urban Sprawl[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3283-3294. [车通, 李成, 罗云建. 城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3283-3294.]
- [6] Liu Rui, Zhu Daolin, Zhu Zhanqiang, *et al.* Analysis of the Driving Forces of Urban Sprawl in Dezhou City based on a Logistic Regression Model[J]. *Open Journal of Nature Science*, 2009, 31(11): 1919-1926. [刘瑞, 朱道林, 朱战强, 等. 基于 Logistic 回归模型的德州市城市建设用地扩张驱动力分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(11): 1919-1926.]
- [7] Lin G C S. Reproducing Spaces of Chinese Urbanization: New City-based and Land-centred Urban Transformation [J]. *Urban Studies*, 2007, 44(9): 1827-1855. doi: 10.1080/00420980701426673.
- [8] Lin, G C S. Scaling-up Regional Development in Globalizing China: Local Capital Accumulation, Land-centred Politics, and Reproduction of Space [J]. *Regional Studies*, 2009, 43(3): 429-447. doi: 10.1080/00343400802662625.
- [9] Verburg P H, van Eck J R R, de Nijs T C M, *et al.* Determinants of Land-use Change Patterns in the Netherlands [J]. *Environment & Planning B Planning & Design*, 2004, 31(1): 125-150. doi: 10.1068/b307.
- [10] Li Xiaoyong. Urban Land Use Change During 1980-2015 and Future Scenario Simulation in Beijing-Tianjin-Hebei Urban [J]. *Economic Geography*, 2019, 39(3): 187-194. [李孝永. 京津冀 1980~2015 年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟[J]. *经济地理*, 2019, 39(3): 187-194.]
- [11] Veldkamp A, Lambin E F. Predicting Land-use Change [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2001, 85(1): 1-6. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00199-2.
- [12] Kok K, Veldkamp A. Evaluating Impact of Spatial Scales on Land Use Pattern Analysis in Central America [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 85(1): 205-221. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00185-2.
- [13] Zeng C, Zhang M D, Cui J X, *et al.* Monitoring and Modeling Urban Expansion—A Spatially Explicit and Multi-scale Perspective [J]. *Cities*, 2015, 43: 92-103. doi: 10.1016/j.cities.2014.11.009.
- [14] Ning Xiuhong, Guo Long, Zhang Haitao. Comprehensive Degree of Land-use at Different Scales based on Spatial Autocorrelation Regression and Geographically Weighted Regression Models [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 32(4): 48-54. [宁秀红, 郭龙, 张海涛. 基于空间自回归和地理加权回归模型的不同尺度下土地利用程度研究[J]. *华中农业大学学报*, 2013, 32(4): 48-54.]
- [15] Chen Y B, Chang K T, Karacsonyi D, *et al.* Investigating Urbanization and Its Spatial Determinants in the Central Districts of Guangzhou, China [J]. *Habitat International*, 2016, 51: 59-69. doi: 10.1016/j.habitatint.2015.10.013.
- [16] Zhang Z, Su S, Xiao R, *et al.* Identifying Determinants of Urban Growth from A Multi-scale Perspective: A Case Study of the Urban Agglomeration around Hangzhou Bay, China [J]. *Applied Geography*, 2013, 45(45): 193-202. doi: 10.1016/j.apgeog.2013.09.013.
- [17] Tan R, Liu Y, Liu Y, *et al.* Urban Growth and Its Determinants across the Wuhan Urban Agglomeration, Central China [J]. *Habitat International*, 2014, 44: 268-281. doi: 10.1016/j.habitatint.2014.07.005.
- [18] Bhatta B, Saraswati S, Bandyopadhyay D. Urban Sprawl Measurement from Remote Sensing Data [J]. *Applied Geography*, 2013, 30(4): 731-740. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.02.002.
- [19] Zhou Y X, Ma L J C. Economic Restructuring and Suburbanization in China [J]. *Urban Geography*, 2000, 21(3): 205-236. doi: 10.2747/0272-3638.21.3.205.
- [20] Zhu Q. Master Plan, Plan Adjustment and Urban Development Reality under China's Market Transition: A Case Study of Nanjing [J]. *Cities*, 2013, 30: 77-88. doi: 10.1016/j.cities.2011.12.010.
- [21] Chen J L, Gao J L, Yuan F, *et al.* Spatial Determinants of Urban Land Expansion in Globalizing Nanjing, China [J]. *Sustainability*, 2016, 8(9): 868-868. doi: 10.3390/su8090868.
- [22] Gao Jinlong, Chen Jianglong, Yuan Feng, *et al.* Patterns, Functions and Underlying Mechanisms of Urban Land Expansion in Nanjing [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(10): 1892-1907. [高金龙, 陈江龙, 袁丰, 等. 南京市建设用地扩张模式、功能演化与机理[J]. *地理研究*, 2014, 33(10): 1892-1907.]
- [23] Qiao Weifeng, Mao Guangxiong, Wang Ya, *et al.* Research on Urban Expansion and Land Use Change in Nanjing over the Past 32 Years [J]. *Geo-Information Science*, 2016, 18(2): 200-209. [乔伟峰, 毛广雄, 王亚, 等. 近 32 年来南京城市扩展与土地利用演变研究[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(2): 200-209.]
- [24] Qiao Weifeng, Liu Yansui, Wang Yahua, *et al.* The Relationship of Evolution between Urban Land Use Types and Intensity in Nanjing since the Early [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1800-1810. [乔伟峰, 刘彦随, 王亚华, 等. 21 世纪初期南京城市用地类型与用地强度演变关系[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1800-1810.]
- [25] Xu Hailong, Yin Haiwei, Kong Fanhua, *et al.* Urban Sprawl Simulation based on the Loose Coupling between Potential-limitation and SLEUTH Model in Nanjing City [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 529-540. [徐海龙, 尹海伟, 孔繁华, 等. 基于潜力—约束和 SLEUTH 模型松散耦合的南京城市扩展模拟[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 529-540.]