

# 基于夜间灯光遥感数据的城市土地集约利用评价模型

程 歆<sup>1</sup>, 邵 华<sup>1\*</sup>, 李 杨<sup>2,3,4</sup>, 王亚华<sup>2,3,4</sup>, 袁 源<sup>2,3,4</sup>

(1. 南京工业大学测绘科学与技术学院, 南京 211800; 2. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京, 210023;  
3. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023; 4. 江苏省地理信息资源开发与  
利用协同创新中心, 南京 210023)

**摘 要:** 该文利用夜间灯光遥感数据和城市建成区统计数据进行城市土地集约利用研究, 构建基于城市灯光强度的土地集约利用评价模型, 并对城市夜间灯光和土地城市化的异速生长特征进行分析; 考虑到城市灯光数据反映出的土地城市化可能存在滞后效应, 提出一种顾及滞后效应的城市灯光-土地城市化水平土地集约利用评价模型, 选择江苏省不同发展水平的典型城市, 分别进行基于滞后项系数的灯光与存量用地和新增用地之间的制约关系分析。试验结果表明: 夜间灯光遥感数据能较好反映城市土地利用水平, 城市灯光相对于土地城市化存在滞后现象, 相比于传统的异速生长模型, 该文提出的顾及滞后效应的异速生长模型在城市土地集约利用的研究中拟合优度有较明显的提高, 在江苏省 5 个典型城市的对比试验中平均提高 4.0%, 并且江苏省“1+3”新功能格局在异速生长模型特征分析中也有明显的地区特征, 验证了模型的适用性。该研究可为中国城市化过程中的土地集约利用评价方法提供参考。

**关键词:** 土地利用; 模型; 遥感; 夜间灯光; 异速生长; 城市化; 土地集约利用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.08.034

中图分类号: P964; F299.27

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-08-0262-07

程 歆, 邵 华, 李 杨, 王亚华, 袁 源. 基于夜间灯光遥感数据的城市土地集约利用评价模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 262—268. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.08.034 http://www.tcsae.org

Cheng Xin, Shao Hua, Li Yang, Wang Yahua, Yuan Yuan. Evaluation model of urban land intensive use based on nighttime light remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 262—268. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.08.034 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

20 世纪 90 年代以来, 中国进入了快速的城镇化发展阶段<sup>[1]</sup>。在城镇化过程中, 城镇建设面积逐步扩大, 城镇建设用地效益不断提升, 大量人口向城市聚集。然而, 由于区域经济发展和资源配置的不平衡, 城镇土地资源存在低效利用的现象<sup>[2]</sup>。在新型城镇化背景下, 迫切需要推进供给侧结构性改革, 优化土地资源利用结构, 提高土地资源利用效益, 从而合理控制城市建设用地规模。在传统城镇土地集约利用研究中, 学者们多使用各类社会经济统计数据, 基于层次分析构建评价指标, 对评价指标结果进行评估和分析<sup>[3-4]</sup>。然而, 在此过程中, 存在统计数据收集困难、基础数据处理费时、数据“垄断”、数据失真等诸多问题。

1976 年, 美国国防气象卫星计划发射的 F1 卫星首次搭载 OLS 传感器, 可探测到城市夜间的灯光。李德仁院士等<sup>[5]</sup>指出, 夜光遥感在反映人类社会活动上具有独特能

力。同时, 夜间灯光数据其时空连续性能有效弥补传统统计数据不全、统计口径不一的缺点, 处理更加便捷。目前, 夜间灯光数据已在人口估算<sup>[6-9]</sup>、GDP 估计<sup>[10-11]</sup>、城市扩张监测<sup>[12-13]</sup>、城市经济效率评估<sup>[14]</sup>、城市能源消费研究<sup>[15]</sup>和城市发展空间特征<sup>[16-17]</sup>等城市空间数据挖掘领域得到广泛应用。各种研究结果都表明夜间灯光与城市各类社会经济指标有较好的相关性, 能反映一个城市的经济活跃程度。因此, 夜间灯光被公认为是研究社会经济活动及影响的良好数据来源。另一方面, 异速生长模型在城市地理学研究中获得了广泛的应用, 异速生长分析在研究城市体系各要素间的标度特征上具有重要意义<sup>[18-19]</sup>。陈彦光等<sup>[20]</sup>通过分析城市人口和城区面积的关系, 发现两者在地级市尺度服从异速生长定律, 异速生长定律为协调城市化过程中的人地关系提供了重要的科学依据<sup>[21-22]</sup>。

本文针对城市土地集约利用问题开展研究, 以江苏省为研究区, 借助夜间灯光数据和统计年鉴数据, 尝试利用异速生长模型分析夜间灯光强度和城市土地集约利用程度的关系, 探讨利用夜间灯光数据监测城市土地集约利用情况的可行性。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

江苏省位于中国大陆东部沿海地区中部, 地跨东经 116°18'~121°57', 北纬 30°45'~35°20', 是长江三角洲地

收稿日期: 2017-12-13 修订日期: 2018-03-29

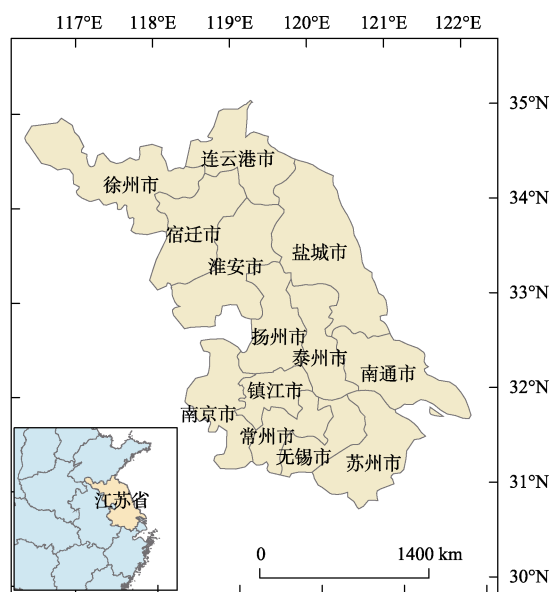
基金项目: 国家自然科学基金项目(41501431, 41601449, 41371172); 江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJD420002)

作者简介: 程 歆, 主要从事遥感影像分析、空间数据挖掘研究。南京 南京工业大学测绘科学与技术学院, 211800。

Email: chengxin2016@njtech.edu.cn

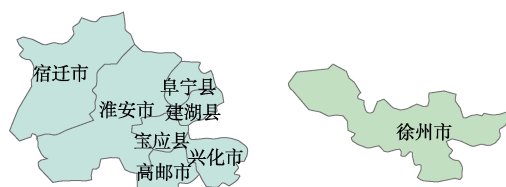
\*通信作者: 邵 华, 博士, 讲师, 主要从事遥感影像分析、地理科学数据共享、空间数据挖掘研究。南京 南京工业大学测绘科学与技术学院, 211800。Email: shaohua@njtech.edu.cn

区的重要组成部分，也是中国城市化进程最快的省份之一，经济发展水平位于全国前列。然而，全省依然存在地区发展不平衡的情况，城市化发展水平南北梯度差异显著。2017 年江苏省推进发展布局的重构和调整，实行“1+3”重点功能区战略，“1+3”功能区分别为：以南京、镇江、扬州、苏州、无锡、常州、南通和泰州组成的扬子江城市群；以淮安、宿迁 2 个地级市和高邮、宝应、兴化、建湖和阜宁 5 个县组成的江淮生态经济区、以徐州为代表的淮海经济区和以连云港、盐城和南通构成的沿海经济带，如图 1。该格局打破了传统以地理线为区域划分依据的苏南苏中苏北格局，把资源、发展阶段和功能定位作为划分发展的主要依据。



a. 研究区域示意图

a. Schematic diagram of research area



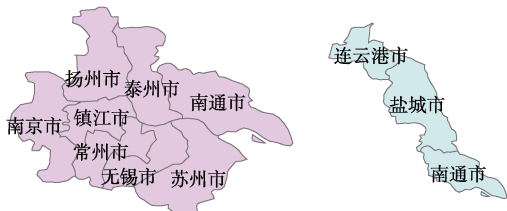
b. 江淮生态经济区

b. Jianghuai ecological economic zone



c. 淮海经济区

c. Huaihai economic zone



d. 扬子江城市群

d. Yangtze river urban agglomeration



e. 沿海经济带

e. Coastal economic belt

图 1 江苏省“1+3”重点功能区战略规划示意图

Fig1 Schematic map of strategic planning of "1+3" key functional areas in Jiangsu province

## 1.2 数据源概况及预处理

DMSP 搭载的 OLS 传感器提供全球最长时间序列 (1992~2013 年) 夜间灯光影像数据, DMSP/OLS 稳定

灯光数据是定标夜间平均灯光强度的年度栅格影像, 该影像包括城镇、乡镇的灯光及其他场所的持久光源且去除了月光云、光火和油气燃烧等偶然噪声的影像。影像参考系为 WGS-84 坐标系, 获取幅宽为 3 000 km, 空间分辨率约为 1 km, 影像像元亮度值 (digital number, DN) 范围为 0~63。DMSP/OLS 数据已成为目前最常用的夜光遥感数据源, 然而, 该数据存在分辨率过低、在城市中心存在过饱和现象<sup>[23]</sup>、城镇边界存在光晕现象<sup>[24]</sup>等缺点。因此在使用夜间灯光数据之前需要对数据进行一系列的预处理工作以保证试验结果的准确性。由 NASA 和 NOAA 联合研制的 VIIRS 可见红外成像辐射仪, 相比于 DMSP, 大幅度提高了清晰度和敏感度, 消除了过饱和现象, 光晕现象明显减少, 影像的空间分辨率为 0.5 km。该数据产品包括月合成数据和年合成数据。

本研究选择数据包括: 1993~2012 年 DSMP/OLS 夜间稳定灯光数据, 2015 年 NPP/VIIRS 连续 12 个月的无云月合成夜间灯光系列数据; 1996~2012 年江苏省各地级市及 2015 年江苏省各县建成区面积统计数据; 2012 年江苏省地级市和县行政区划矢量图。

将 DMSP/OLS 夜间灯光数据用于研究城市土地集约利用问题时, 主要存在以下问题<sup>[25]</sup>: 1) 同年不同传感器获取的影像之间存在差异; 2) 不同年份的影像其相同位置像元的 DN 值之间存在异常波动; 3) 过饱和现象。为保证研究结果的准确性, 需要对研究区数据进行预处理, 本文使用不变目标区域法<sup>[26]</sup>, 提取江苏地区的夜间灯光影像进行灯光互校正。根据研究区统计数据, 选择宝应县作为不变区域 (该区域经济统计数据在 17 年间变化相对较小、发展过程稳定, 同时包含了从低到高较广的 DN 值范围)。使用 NOAA 提供的经过辐射定标的 F162006 影像与 DMSP/OLS 夜间灯光数据 (1996~2012 年) 进行互相校正<sup>[27]</sup>。本研究选择使用饱和校正模型<sup>[28]</sup>对校正影像和参考影像进行拟合, 在此基础上开展不同传感器间的同年度影像校正以及不同年份的影像校正, 最终校正结果如图 2 所示, 对比 2000 年和 2010 年校正前后影像, 过饱和现象得到明显的改善。

利用预处理完成的 DMSP/OLS 夜间灯光数据, 基于 ArcGIS 中的空间分析工具提取地级市和区县行政区域范围内的平均灯光强度, 即

$$L_n = L_0 / A_n \quad (1)$$

式中  $n$  为时间,  $L_n$  为行政区划范围内单位面积平均灯光强度,  $L_0$  为行政区划范围内的灯光总强度,  $A_n$  为行政区域总面积,  $\text{km}^2$ 。

并利用统计年鉴数据计算江苏省各市和区县的土地城市化水平  $S_n$

$$S_n = M_n / A_n \times 100 \quad (2)$$

式中  $S_n$  为第  $n$  年行政区域内土地城市化水平,  $M_n$  为第  $n$  年建成区面积,  $A_n$  为第  $n$  年行政区域总面积。

## 1.3 研究方法

异速生长定律最早是生物学和生态学中被提出的概念<sup>[29]</sup>, 之后被引入城市地理学, 用于研究城市系统中各

要素之间或某要素与整体之间的标度特征。这种方法后来在城市化研究中多用于描述城市人口和城区面积的非线性关系。该方法在城市发展要素因果解释、系统分析和发展预测方面具有重要价值。

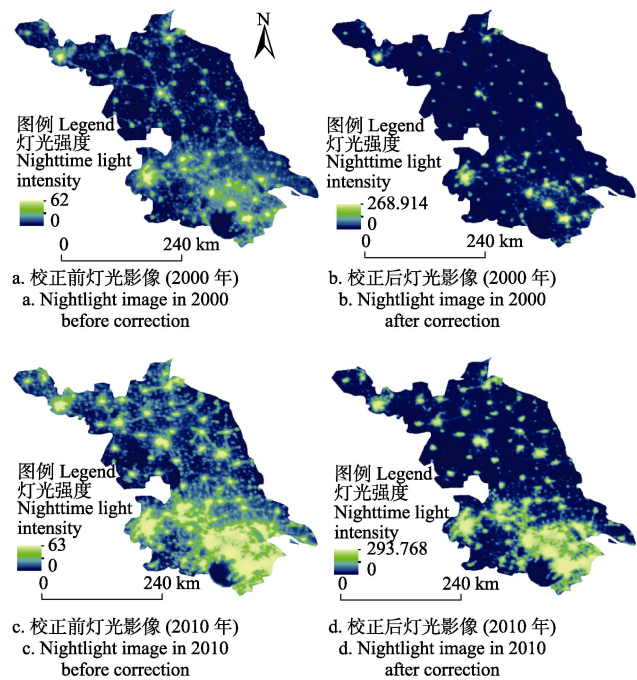


图2 江苏省校正前后夜间灯光影像对比  
Fig.2 Contract of nighttime light images before and after correction in Jiangsu Province

异速生长指系统中某个局部和整体或者另一个局部的几何测度关系，即系统中的某个局部的相对增长率和系统或者另一个局部的相对增长率的比值<sup>[30]</sup>。其数学表达形式为

$$\frac{1}{y} \frac{dy}{dt} = b \frac{1}{x} \frac{dx}{dt} \tag{3}$$

式中  $y$  为局部某要素， $x$  为系统或者另一局部的某要素， $b$  为异速生长系数，即增长率的比值。当系统中 2 个相关要素满足式 (1) 时，则可以说明该系统服从异速生长定律，上式可转化为幂函数形式，即

$$y = ax^b \tag{4}$$

1.3.1 城市灯光强度-土地城市化水平异速生长模型

本研究对 1996 年至 2012 年江苏省各地级市城市灯光强度和土地城市化水平进行线性函数、对数函数和幂函数 3 种回归模型进行回归分析，对不同回归函数的相关系数进行比较，幂函数整体效果相对最好，如表 1。

理论上，如果系统中 2 个要素满足几何测度关系，其要素间就一定具有异速生长特征<sup>[31]</sup>，从而服从上述幂函数模型。因此，城市灯光强度和土地城市化水平间具有异速生长特征。将公式 (4) 等号左右两边取对数，构建城市灯光强度-土地城市化水平异速生长模型，经过转化后模型如下

$$\ln L = \alpha_0 + \alpha_1 \ln S \tag{5}$$

式中  $\alpha_0$  为常数项， $\alpha_1$  为回归系数（异速生长系数）， $L$  为城市灯光强度， $S$  为土地城市化水平。

表1 灯光强度和土地城市化水平在不同的回归模型中的拟合优度

Table 1 Goodness of fit for different regression model			
城市 Cities	线性模型 Linear model	对数模型 Logarithm model	幂函数模型 Power model
南京	0.716	0.709	0.784
无锡	0.889	0.843	0.894
徐州	0.849	0.807	0.882
常州	0.902	0.964	0.941
苏州	0.975	0.961	0.986
南通	0.908	0.932	0.912
连云港	0.885	0.873	0.923
淮安	0.918	0.895	0.935
盐城	0.808	0.757	0.836
扬州	0.814	0.760	0.839
镇江	0.835	0.754	0.848
泰州	0.746	0.688	0.750
宿迁	0.679	0.595	0.705

当  $\alpha_1$  大于 1 时，为正异速生长，即灯光强度的增加速度大于城市用地扩张速度，则说明土地利用为集约型；当  $\alpha_1$  等于 1 时，为同速生长，即灯光增长速度和城市用地扩张速度相当；当  $\alpha_1$  小于 1 时，为负异速生长，即灯光强度增长速度小于城市用地扩张速度，则说明土地利用为粗放型。

1.3.2 顾及滞后效应的异速生长模型

由于在城市土地扩张的过程中，从土地的开发到进入稳定利用期需要一定时间，新增用地需要经过一段时间才能使新增用地的夜间灯光强度明显增加，这意味着土地城市化对城市灯光强度的影响具有一定程度的滞后效应。异速生长模型中的被解释变量除了受当期的解释变量的影响，很可能还受上一期解释变量的影响。因此，本文考虑在异速生长模型中引入  $(n-1)$  年的土地城市化水平，即加入含滞后期的参数项，使用当期城市灯光强度为被解释变量，当期土地城市化水平和上一期土地城市化水平同时作为解释变量构建模型，经过修改后的模型如下

$$\ln L_n = \beta_0 + \beta_1 \ln S_n + \beta_2 \ln S_{n-1} \tag{6}$$

式中  $\beta_0$  为常数项， $\beta_1$  为当期异速生长系数， $\beta_2$  为滞后项系数， $L_n$  为第  $n$  年的行政区划范围内单位面积平均灯光强度， $S_n$  为第  $n$  年的土地城市化水平， $S_{n-1}$  为第  $(n-1)$  年的土地城市化水平。

2 结果与分析

2.1 灯光-土地城市化异速生长特征分析与评价

本文使用异速生长模型反映城市灯光强度和土地城市化水平的增长关系，灯光强度为被解释变量，土地城市化水平为解释变量，基于序空间对江苏省 13 个地级市



(1996–2012 年)逐年的城市平均灯光强度和土地城市化水平的异速生长系数进行分析,得到各城市的异速生长回归结果如表 2 所示。

表 2 江苏省地级市异速生长模型回归结果  
Table 2 Resulting data of allometric growth model for cities in Jiangsu province

城市 Cities	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$R^2$	$F$
南京	1.630	0.595	0.795	73.898
无锡	1.304	1.032	0.894	80.575
徐州	1.508	0.778	0.882	110.005
常州	1.173	1.389	0.941	286.991
苏州	1.640	0.908	0.986	144.411
南通	1.515	1.504	0.912	92.495
连云港	1.593	0.851	0.923	53.798
淮安	1.481	1.032	0.935	227.044
盐城	1.708	0.856	0.836	185.049
扬州	1.359	1.219	0.839	87.221
镇江	1.147	1.319	0.848	267.198
泰州	1.687	1.011	0.750	96.516
宿迁	1.781	0.335	0.705	65.987

注： $\alpha_0$  异速生长模型常数项， $\alpha_1$  异速生长系数， $R^2$  为拟合优度。  
Note:  $\alpha_0$  constant term of the allometric growth model,  $\alpha_1$  allometric growth index,  $R^2$  goodness of fit.

结果表明,异速生长模型拟合度较好, $F$  检验 sig 小于 0.05,模型通过检验。通过江苏省各市异速生长系数( $\alpha_1$ )比较可以看出, $\alpha_1$  明显大于 1 的城市有常州、南通、扬州和镇江,说明以上城市表现为正异速生长,土地城市化过程中城区土地利用效益高,属于集约型发展; $\alpha_1$  接近于 1 的城市有无锡、苏州、淮安和泰州,土地城市化和灯光强度相对同速生长,城市土地扩张与经济活跃程度相一致; $\alpha_1$  小于 1 的城市有南京、徐州、连云港、盐城以及宿迁,为负异速生长,土地扩张速度比城市灯光增长速度快,说明城市土地利用存在粗放现象。

通过对各城市的异速生长系数的对比,发现不同城市的该系数有明显的梯度差异,分别为明显大于 1、接近于 1 和明显小于 1 的 3 个梯度。因此为进一步分析江苏省城市土地集约化程度的分布情况,使用自然断裂点分级法<sup>[32]</sup>对各地级市异速生长系数进行分级,如图 3 所示。

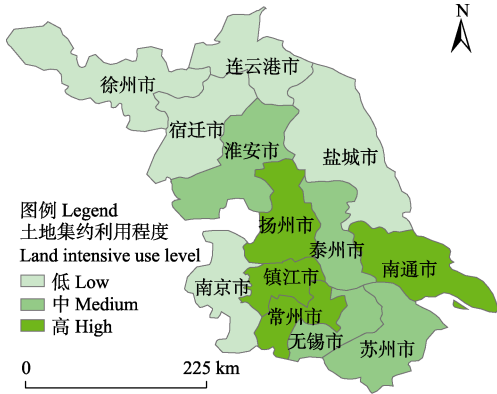
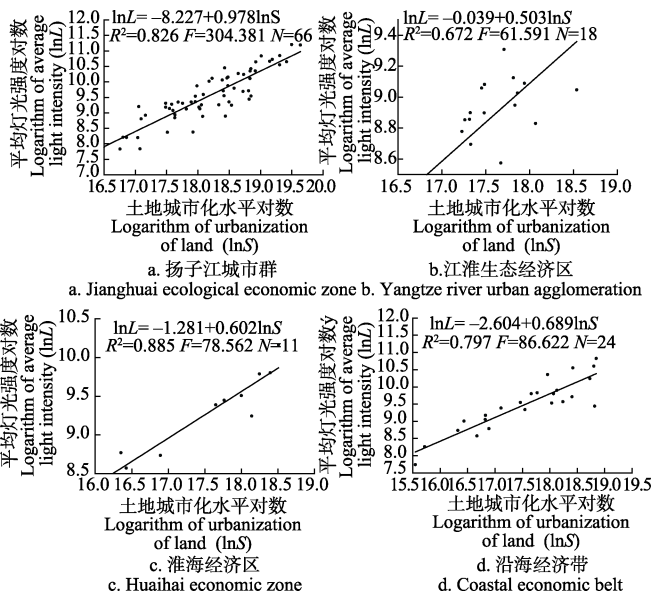


图 3 江苏省各地级市土地集约化利用程度分布图  
Fig 3 Land intensive use level in cities of Jiangsu Province

从图 3 中可以看到,江苏省城市土地集约利用程度总体上存在明显南北差异,苏北欠发达地区的粗放问题较为严重;常州、扬州、镇江和南通灯光增长速度相比于城市建成区的扩张速度普遍更快,呈现正异速生长形式,其中苏州、无锡、泰州和淮安为同异速生长,灯光增长速度和城市扩张速度也基本相当,说明该地区土地城市化过程中土地资源利用效益较高,土地利用为集约型。而苏北地区城市的土地利用成粗放型,经济发展水平较低,经济活跃性不高是其土地开发效益低下的主要原因。然而,南京作为发达地区的中心城市,其城市土地扩张过程中依然存在土地粗放利用的问题,其主要原因可能是发展主要集中在中心城区,同时溧水和高淳两地的土地利用效益过低,导致南京市整体土地集约程度较低。

在上述模型结果的基础上,本文尝试结合夜间灯光数据,进一步探讨江苏省“1+3”功能区格局,分析各功能区的土地集约利用情况。由于 2013 年之后 NOAA 不再提供 DMSP/OLS 夜间灯光数据,NPP/VIIRS 夜间灯光数据时间跨度较小,本文使用 2015 年 NPP/VIIRS 夜间灯光数据基于相空间选取各功能区内所有县市区作为样本,对“1+3”功能区格局进行异速生长特征分析,其中扬子江城市群、江淮生态经济区、淮海经济区和沿海经济带的异速生长模型回归模型结果如图 4。



注： $N$  为样本量。  
Note:  $N$  is the number of selected samples.

图 4 江苏省“1+3”新功能区格局异速生长模型结果  
Fig.4 Result of allometric growth model for “1+3” functional zone of Jiangsu Province

图 4 结果表明,异速生长模型在“1+3”各功能区有较好的拟合优度,扬子江城市群异速生长系数为 0.978,明显高于其他 3 个地区,其生长系数接近于 1,说明该区域土地城市化扩张与灯光增长基本同速,土地集约利用程度较高;沿海经济带土地集约利用程度为 0.689,淮海经济区和江淮生态经济区土地集约利用程度较低,分别为

0.602 和 0.503, 说明该地区土地开发存在粗放现象。对比江苏省主体功能区规划图和江苏省土地利用总体规划(2006~2020 年), 本文的研究结果和规划中提及的城市土地情况基本相符。2017 年江苏省推动的“1+3”重点功能区规划打破了传统的苏南、苏北和苏锡常都市圈的格局, 基于上述试验验证了“1+3”重点功能区战略的合理性, 对江苏经济地理格局的变化具有一定参考价值。

## 2.2 顾及滞后效应的异速生长模型分析与评价

由于灯光增加相对城市土地扩张有一定的滞后效应, 因此本文选取集约程度中等的江苏省苏州市、无锡市和淮安市以及集约程度较低的南京市和宿迁市为例, 分析土地城市化过程中滞后效应在不同发展水平地区的影响程度。将 1997 年至 2012 年的当年土地城市化水平和对应的上一年土地城市化水平作为解释变量, 1997 年至 2012 年平均灯光强度作为被解释量。根据修改后的模型对各城市进行回归分析, 并将拟合优度与未修改的模型的拟合优度进行对比, 如表 3 所示。

表 3 顾及滞后效应异速生长模型模型试验结果  
Table 3 Experiment result of allometric growth model with lag effect

城市 Cities	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R_a^2$	$R_b^2$
南京	1.663	0.098	0.500	0.865	0.795
无锡	1.341	0.221	0.823	0.926	0.894
苏州	1.654	0.633	0.280	0.988	0.986
淮安	1.522	0.424	0.637	0.941	0.935
宿迁	1.837	0.003	0.326	0.767	0.705

注:  $\beta_0$  为常数项,  $\beta_1$  为当期异速生长系数,  $\beta_2$  为滞后项系数,  $R_a^2$  为不含滞后项异速生长模型拟合优度,  $R_b^2$  为顾及滞后项异速生长模型拟合优度。

Note:  $\beta_0$  constant term,  $\beta_1$  current allometric growth index,  $\beta_2$  lag term coefficient,  $R_a^2$  is goodness of fit for allometric growth model without lag term,  $R_b^2$  is goodness of fit for allometric growth with lag effect

由表 3 可以看出增加滞后项模型的拟合优度有明显提高, 最高增幅为 8.8%, 平均增幅为 4.0%, 说明灯光与城市用地之间存在滞后效应, 该年灯光强度会受到存量用地的影响。除苏州市以外, 其他城市的滞后项系数更高, 说明对城市灯光的增长而言, 受存量用地的影响比新增用地的影响大。其中, 南京市和宿迁市分别属于发达地区的强中心和欠发达地区的强中心, 且两地的土地集约利用程度都偏低, 从含滞后项模型的系数可以看出, 2 个城市的  $\beta_2$  均明显大于  $\beta_1$ , 说明灯光的增长主要聚集在存量用地上, 该城市城镇化程度高, 发展主要集中在中心城区, 而新扩张的用地利用效益较低。无锡市和苏州市作为土地利用集约的发达地区, 在含滞后项模型的回归中也有差别, 其中无锡市的回归方程系数中  $\beta_2$  明显大于  $\beta_1$ , 说明存量用地对城市灯光强度增长的影响更加明显, 新增用地的利用效率较低; 而苏州市则表现为  $\beta_1$  明显大于  $\beta_2$ , 说明苏州新增用地开发强度高, 新增用地表现为集约利用。淮安市的两个解释变量系数相对比较均衡, 新增用地的利用效率相对于存量用地略低, 反映城市基本呈一体化的发展态势。

综上所述, 城市灯光增长与城市土地扩张之间符合异速生长定律, 且城市夜间灯光增长相对于城市土地扩张具有滞后性。相比于新增用地, 存量用地对灯光增长的贡献更高。发达地区和欠发达地区都存在城市发展主要集中在中心城区, 新增用地的利用效益较低的现象。城市土地由城市中心向四周扩张的过程中土地集约利用程度呈下降趋势。本研究显示夜间灯光主要聚集在存量用地上, 在城镇扩张的过程中, 人口和主要经济活动依然集中在城镇中心地带, 耕地后备资源的空间受到一定挤压, 新增的建设用地没有得到高效的利用。同时, 江苏省土地利用的区域差异较大, 苏南地区的城市化和工业化速度远高于苏中、苏北地区, 苏北、苏中地区仍然是传统的农业地区, 随着江苏省重点功能区规划的推动, 有利于发挥各地区产业优势, 形成农业用地与建设用地并重之势, 推动城乡统筹和区域一体化发展。

## 3 结 论

本文借助长时间序列夜间灯光遥感数据在社会和经济问题研究上的优势, 对城市土地集约利用问题进行探讨, 基于灯光强度和土地城市化水平构建异速生长模型, 分析江苏省城市灯光-土地城市化水平异速生长特征, 同时考虑到灯光增长相比于土地开发可能存在滞后性, 利用顾及滞后效应的异速生长模型分析土地集约利用水平, 以江苏省为例验证了该模型的适用性, 主要结论如下:

1) 异速生长模型能较好的拟合土地城市化水平, 异速生长系数能够反映不同功能区城市特点。在江苏省 13 个地级市中, 不同城市的异速生长系数有明显的梯度差异, 分别为明显大于 1、接近于 1 和明显小于 1 的 3 个梯度。江苏省“1+3”功能区在异速生长模型中都有较好的拟合度, 扬子江城市群、沿海经济带、淮海经济区和江淮生态经济区的异速生长系数分别为 0.978、0.689、0.602 和 0.503, 验证了“1+3”重点功能区战略的合理性。

2) 顾及滞后效应的异速生长模型能够提高原有模型对土地城市化水平拟合的精度。相对普通异速生长模型, 使用增加滞后项的异速生长模型对江苏省 5 个典型城市土地城市化水平进行拟合, 其拟合优度平均提高 4.0%, 最高达 8.8%, 验证了该模型能较好的反映夜间灯光与城市用地之间存在滞后效应。

3) 对城市灯光的增长而言, 受存量用地的影响比新增用地的影响大。除苏州市以外的城市中, 在顾及滞后效应的异速生长模型中的异速生长系数比标准异速生长模型中更大, 表明灯光的增长主要聚集在存量用地上, 而苏州新增用地的集约利用程度较高。

夜间灯光遥感数据受到多种复杂因素的影响, 在今后的研究中, 可进一步探讨如何利用多数据源结合夜间灯光数据来提高土地集约利用分析的精度。

致谢 感谢国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据共享服务平台-长三角科学数据中心 (http://nnu.geodata.cn:8008/) 提供数据支撑。

## [参 考 文 献]

- [1] 顾朝林, 徐海贤. 改革开放二十年来中国城市地理学研究进展[J]. 地理科学, 1999, 19(4): 320—331.  
Gu Chaolin, Xu Haixian. Development of urban geography in China since 1978[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(4): 320—331. (in Chinese with English abstract)
- [2] 孙宇杰, 陈志刚. 江苏省城市土地集约利用与城市化水平协调发展研究[J]. 资源科学, 2012, 34(5): 889—895.  
Sun Yujie, Chen Zhigang. Coordinated development between urban land intensive use and urbanization level in Jiangsu province[J]. Resources Science, 2012, 34(5): 889—895 (in Chinese with English abstract)
- [3] Lau S S Y, Giridharan R, Ganesan S. Multiple and intensive land use: Case studies in Hong Kong[J]. Habitat International, 2005, 29(3): 527—546.
- [4] 姜海, 曲福田, 欧名豪, 等. 区域土地集约利用评价方法与应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增 1): 117—123.  
Jiang Hai, Qu Futian, Ou Minghao, et al. Evaluation methods and application of regional land-use intensity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(Supp. 1): 117—123. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591—601.  
Li Deren, Li Xi. An overview on data mining of nighttime light remote sensing[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2015, 44(6): 591—601. (in Chinese with English abstract)
- [6] 卓莉, 陈晋, 史培军, 等. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 266—276.  
Zhuo Li, Chen Jin, Shi Peijun, et al. Modeling population density of China in 1998 based on DMSP/OLS nighttime light image[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2): 266—276. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨妮, 吴良林, 邓树林, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的省域 GDP 统计数据空间化方法: 以广西壮族自治区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(4): 108—111.  
Yang Ni, Wu Lianglin, Deng Shulin, et al. Spatialization method of provincial statistical GDP data based on DMSP/OLS night lighting data: A case study of Guangxi zhuang autonomous region[J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(4): 108—111. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈晴, 侯西勇. 集成土地利用数据和夜间灯光数据优化人口空间化模型[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(11): 1370—1377.  
Chen Qing, Hou Xiyong. An improved population spatialization model by combining land use data and DMSP/OLS data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(11): 1370—1377. (in Chinese with English abstract)
- [9] Lo C P. Modeling the population of china using dmsp operational linescan system nighttime data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(9): 1037—1048.
- [10] Ghosh T, Powell R L, Elvidge C D, et al. Shedding light on the global distribution of economic activity[J]. Open Geography Journal, 2010, 3(1): 148—161.
- [11] Doll C N H, Muller J P, Morley J G. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery[J]. Ecological Economics, 2006, 57(1): 75—92.
- [12] Cova T J, Sutton P C, Theobald D M. Exurban change detection in fire-prone areas with nighttime satellite imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(11): 1249—1257.
- [13] He C, Liu Z, Tian J, et al. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: A multiscale landscape perspective[J]. Global Change Biology, 2014, 20(9): 2886.
- [14] Wu W, Wang H, Zhao H, et al. Research of China urban efficiency based on Suomi-NPP night-time light data[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 36: 146—153.
- [15] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995—2009 年中国地级市能源消费动态[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 625—634.  
Wu Jiansheng, Niu Yan, Peng Jian, et al. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light[J]. Geographical Research, 2014, 33(4): 625—634. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吴健生, 赫胜彬, 彭建, 等. 基于 DMSP-OLS 数据的城市发展空间特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2): 20—25.  
Wu Jiansheng, He Shengbin, Peng Jian, et al. Research on spatial characteristics of urban development based on DMSP-OLS data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(2): 20—25. (in Chinese with English abstract)
- [17] Huang X, Schneider A, Friedl M A. Mapping sub-pixel urban expansion in China using MODIS and DMSP/OLS nighttime lights[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 175: 92—108.
- [18] 刘继生, 陈彦光. 山东省城市人口-城区面积的异速生长特征探讨[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 135—141.  
Liu Jisheng, Chen Yanguang. An allometric analysis of the Shandong urban system using ideas from Fractals[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 135—141. (in Chinese with English abstract)
- [19] Lee Y. An allometric analysis of the U.S. urban system: 1960—80[J]. Environment & Planning A, 1989, 21(4): 463—476.
- [20] 陈彦光, 许秋红. 区域城市人口—面积异速生长关系的分形几何模型: 对 Nordbeck-Dutton 城市体系异速生长关系的理论修正与发展[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 1999, 12(2): 198—203.  
Chen Yanguang, Xu QiuHong. Studies on the fractal geometric model of allometric growth relationships between area and population of urban systems[J]. Journal of Xinyang Normal University, 1999, 12(2): 198—203. (in Chinese with English abstract)
- [21] 孙在宏, 袁源, 王亚华, 等. 基于分形理论的江苏省城市规模分布与异速生长特征[J]. 地理研究, 2011, 30(12): 2163—2172.  
Sun Zaihong, Yuan Yuan, Wang Yahua, et al. Research on city-size distribution and allometric growth in Jiangsu Province based on fractal theory[J]. Geographical Research, 2011, 30(12): 2163—2172. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王亚华, 袁源, 王映力, 等. 人口城市化与土地城市化耦合发展关系及其机制研究: 以江苏省为例[J]. 地理研究, 2017, 36(1): 149—160.  
Wang Yahua, Yuan Yuan, Wang Yingli, et al. Relationship and mechanism of coupling development between population and land urbanization: A case study of Jiangsu province[J]. Geographical Research, 2017, 36(1): 149—160. (in Chinese with English abstract)
- [23] Bennett M M, Smith L C. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate, and monitor socioeconomic dynamics[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 176—197.
- [24] Henderson M, Yeh E T, Gong P, et al. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite

- imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(3): 595—609.
- [25] 宋金超, 李新虎, 吝涛, 等. 基于夜晚灯光数据和 Google Earth 的城市建成区提取分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(6): 750—756.
- Song Jinchao, Li Xinhui, Lintao, et al. A method of extracting urban built-up area based on DMSP/OLS nighttime data and Google Earth[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(6): 750—756. (in Chinese with English abstract)
- [26] Pandey B, Zhang Q, Seto K C. Comparative evaluation of relative calibration methods for DMSP/OLS nighttime lights[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 195: 67—78.
- [27] Wu J, He S, Peng J, et al. Intercalibration of DMSP-OLS night-time light data by the invariant region method[J]. International Journal for Remote Sensing, 2013, 34(20): 7356—7368.
- [28] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(9): 1092—1102.
- Cao Ziyang, Wu Zhifeng, Kuang Yaoqiu, et al. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(9): 1092—1102. (in Chinese with English abstract)
- [29] Chen Y. Multi-scaling allometric analysis for urban and regional development[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2016, 465: 673—689.
- [30] 陈彦光, 周一星. 基于 RS 数据的城市系统异速生长分析和城镇化水平预测模型: 基本理论与应用方法[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(6): 819—826.
- Chen Yanguang, Zhou Yixing. Researches in models of allometric analysis of urban systems and forecast of urbanization level based on RS data of urban area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2001, 37(6): 819—826. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘继生, 陈彦光. 山东省城市人口-城区面积的异速生长特征探讨[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 135—141.
- Liu Jisheng, Chen Yanguang. An allometric analysis of the Shandong Urban system using ideas from fractals[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 135—141. (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨俊. 新型城镇化背景下建设用地集约利用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- Yang Jun. Research on Construction Land Intensive Use Under the Background of New Urbanization: A Case Study of Wuhan Urban Agglomeration[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract)

## Evaluation model of urban land intensive use based on nighttime light remote sensing data

Cheng Xin<sup>1</sup>, Shao Hua<sup>1\*</sup>, Li Yang<sup>2,3,4</sup>, Wang Yahua<sup>2,3,4</sup>, Yuan Yuan<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China; 2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210023, China; 3. Cultivation Base of State Key Laboratory of Geographical Environment Evolution, Jiangsu Province, Nanjing 210023, China; 4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** With the acceleration of the urbanization, urban land intensive use becomes necessary for the development of city. In the traditional study of urban land intensive use, all kinds of socio-economic statistical data are used and evaluation indicators based on analytic hierarchy process are built for the analysis of the land intensive use. However, there are many difficulties, such as data collection, data “monopoly” and data distortion. Under the background of new urbanization, it is important to optimize the structure of land resource utilization, improve the utilization efficiency of land resources and rationally control the scale of urban construction land. Jiangsu Province is taken as an example for the urban land intensive use in this research. Nighttime light data are considered as a good data source in the many studies of society and economy, because they can objectively reflect the social and economic activities. Before using nighttime data, a series of pre-processing work is needed to ensure the accuracy of the experimental result. Nighttime light data and built-up area data from 1996 to 2012 in Jiangsu Province are used to construct the allometric growth model of city light intensity - urbanization of land based on order space at the scale of prefecture-level city. And then the nighttime light data and built-up area data in 2015 are used to construct the model based on phase space at county scale. The allometric growth index is used to analyze the growth relation between city light intensity and urbanization of land based on the city scale of Jiangsu Province. At the same time, the effect of time lag of urban light on urban land is considered, and the allometric growth model is improved by adding lag term. A new allometric growth model is constructed. By selecting typical cities with different development levels, restrictive relations between urban light and the stock urban land and the new urban land are assessed separately based on the lag term coefficient. The result shows that the land intensive use level is significantly different from north to south. The new model considering the lag effect is better in analysis of relationship between city light and urban land growth. There is exactly a lagging phenomenon of urban light relative to the urbanization of land. The light of most cities mainly concentrates on the stock land, and the light of the new urban land has lag phenomenon to a certain extent. The new functional area pattern of “1+3” in Jiangsu Province also has obvious regional characteristics of allometric growth. The intensive use level in Yangtze River urban agglomeration is higher than other zones obviously. This study validates the rationality of the strategy of “1+3” functional areas and has a certain reference value to the change of Jiangsu’s economic pattern. This study takes advantage of the urban nighttime light remote sensing data in long time series and large scale, which avoids the cumbersome and time-consuming data collection process in traditional land intensive use evaluation system. It can effectively evaluate the land intensive use level of cities with different development degrees. Therefore, this method can provide a reliable reference guide for the utilization of land resources in China..

**Keywords:** land utilization; models; remote sensing; nighttime light; allometric growth; urbanization; land intensive use