

中国大城市蔓延指数的开发

岳文泽^{1,2}, 吴桐¹, 刘学¹, 张琳琳³, 吴次芳^{1,2}, 叶艳妹^{1,2}, 郑国轴⁴

(1. 浙江大学土地管理系, 杭州 310058; 2. 自然资源部城乡建设用地节约集约利用实验室, 北京 100812;

3. 浙江工商大学城乡规划系, 杭州 310018; 4. 浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310007)

摘要: 城市蔓延已成为具有普遍意义的现象,然而,城市蔓延内涵的争议性和模糊性问题一直没有得到很好的解决。本文将城市蔓延定义为一种低效、低密度、无序的城市空间开发模式,这种开发模式与中国城市高质量发展的目标和要求是相违背的。为实现对城市蔓延的宏观管理和精准调控,有效遏制城市蔓延带来的负面影响,本文开发了一套多维度、可比较的,并且与城镇化质量紧密关联的城市蔓延指数。基于卫星影像与人口、经济统计数据,选取代表城市蔓延核心特征的多个指标,采用主成分分析法计算了全国主要大城市2014年城市蔓延指数。结果发现,经济效率维主成分对综合蔓延指数贡献最大(41.30%),人口密度维主成分次之(20.49%),空间形态维主成分贡献率排第三(12.35%)。值得注意的是,许多经济发展较落后的城市因为经济效率维度的短板效应显著而被列入最蔓延的行列。此外,不同维度城市蔓延指数空间分布差异明显,并且综合蔓延指数与城市规模呈一定的负相关关系。

关键词: 城市蔓延指数;测度;空间形态;密度;效率

DOI: 10.11821/dlxb202012013

1 引言

城市蔓延,作为一种低效、无序的城市空间开发模式^[1-3],可能带来诸如交通拥堵加剧、开敞空间消失、能源消耗过大等一系列负面效应,严重威胁城市的可持续发展^[1, 3-9]。随着全球城市化步伐快速推进,城市蔓延成为一个全球性问题,许多发展中国家也陆续出现城市蔓延现象^[10-14]。1978年改革开放以来,中国的城镇化水平从20%左右快速提升到当前的60%左右,维持年均一个百分点的增长速度,在全球范围内相对领先。相对于人口城镇化速度,中国的土地城镇化更加迅速,城镇土地扩张速度明显快于人口增长速度^[15]。根据《中国城市统计年鉴》,2008—2018年中国的城市人口数量累计增长30.36%,而同期城市建成区面积增长54.91%。如果参照部分学者提出的将土地城镇化速度远快于人口城镇化速度作为城市蔓延的主要评判标准^[16],那么中国过去一段时期内的城镇化已经表现出明显的城市蔓延特征。事实上,随着中国的城镇化向纵深迈进,城市空间扩张模式走向分化。部分城市伴随着人口的增加,空间与经济规模不断扩大。还有一部分城市,虽然空间规模还在不断增加,但已经出现人口流失,甚至面临经济衰退的问题。因此,

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871169, 41671533); 浙江省自然科学基金项目(LQ20D010004) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41871169, No.41671533; Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, No.LQ20D010004]

作者简介: 岳文泽(1977-), 男, 安徽凤台人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城镇化与土地利用。

E-mail: wzyue@zju.edu.cn

通讯作者: 张琳琳(1989-), 女, 浙江海宁人, 博士, 讲师, 研究方向为土地利用、城市规划管理。

E-mail: zhanglinlin@zju.edu.cn

2730-2743 页

当前中国的城市蔓延也不能再以简单的人口与土地增长比来评判了。在新型城镇化建设和可持续发展的双重要求下，只有真实了解城市蔓延的分异特征，分类指导、有的放矢，制定差异化治理策略，才能促进中国国土空间治理体系与治理能力的现代化。

自1937年Earle Dreaper提出“Urban Sprawl”一词后，城市蔓延开始进入相关学者、规划师与城市管理者的视野，其定义也层出不穷。Whyte将城市蔓延定义为城市郊区采用飞地式开发方式产生的蔓延现象^[17]；Gottmann认为城市蔓延是大都市边缘持续不断扩张，以及大城市边缘的带状区域从乡村向城市的转化过程^[18]；Anderson等认为城市蔓延是在城市外围郊区居住用地与商业等其他用地分离的现象^[19]；Dutton认为城市蔓延是城市边缘的主要道路向郊区低密度、无序、功能单一的扩展^[20]；Soule将其界定为一种发生在城市中心边缘的、低密度的、依赖小汽车交通的开发^[21]。随着相关研究的深入，城市蔓延的内涵不断丰富，其复杂性更加显现，突出表现在多维度和多尺度两个层面^[1, 6, 17]。首先，城市蔓延具有多维性：从密度来看，人口密度相对较低或呈下降趋势代表城市蔓延^[16]；从空间形态来看，城市建设用地越破碎分散意味着越蔓延^[22]；从土地利用来看，土地利用混合度高表征城市集约发展^[3, 23-24]；从可达性来看，通勤时间越长则表示越蔓延^[25]。其次，城市蔓延具有多尺度性：从时间尺度来看，城市蔓延既是动态变化的过程，也可理解为某一时点的结果^[1, 26]；从空间尺度来看，在城市整体单元上被视为缺少控制的蔓延式开发，在城市内部单元上可能是有序合理的^[27]。正是由于这种复杂性，城市管理者与公众对城市蔓延往往只有模糊的认知，学界也尚未达成统一的、确切的定义标准。因此在讨论中国的城市蔓延问题之前，有必要给出一个相对明确且易测度的定义。

开发一个定量的、可横向比较的城市蔓延指数来测度城市蔓延的程度是调控和治理一个国家或者区域城市蔓延的先决条件和政策基础。尽管学术界已经深刻认识到城市蔓延测度的标准是模糊的，很难给出一个绝对的、准确的蔓延度^[1]，但关于城市蔓延测度的探索和尝试从未停止。目前城市蔓延测度的实证研究主要可分为两类，一类为多案例的横向比较研究，另一类为单个案例的纵向比较研究。最开始城市蔓延多案例研究主要采用单指标测度，常以人口密度或人口与建设用地增长率之比来量化城市蔓延^[16, 28]。近年来国外城市蔓延多案例研究中多指标测度方法日渐成为主导，主要采用密度、形态格局、土地利用混合度、可达性等指标来度量^[2-3, 14]。国内城市蔓延研究起步相对较晚，多案例研究仍局限于传统单一指标测度方法^[29-30]，多指标测度方法主要出现在单个案例研究中^[26-27, 31]。总体来看，目前中国城市蔓延的定量研究中，多指标测度、多案例比较的实证研究相对缺乏。因此开展多维、多案例的城市蔓延实证测度对于推进中国城市蔓延研究进程至关重要。

综上所述，从多维度指标出发，构建一个与城镇化质量紧密关联的中国城市蔓延指数，测度并比较全国主要大城市的城市蔓延，具有双重意义：一方面可以填补国内相关文献研究空缺；另一方面有助于推进国土空间规划与治理实践，既能刻画单个城市的城市蔓延现状以服务于城市精准调控，又能横向对比若干城市之间的蔓延程度差异以服务于区域宏观管理，为国土空间治理提供多维支撑。基于此，本文选择全国城市土地利用总体规划和用地报国务院审批的106个重点城市（不包含港澳台地区）为实证研究对象，结合中国城市蔓延的典型特征，开发一个基于多指标综合的城市蔓延指数，通过横向比较揭示全国主要大城市的相对蔓延程度和空间差异情况。

2 数据与方法

2.1 多维指标体系构建

由于缺少统一的概念界定，本文基于文献梳理，对国内外学者共识度较高的城市蔓

延内涵进行了梳理。国内外文献关于城市蔓延内涵的论述中,学者们对城市蔓延在空间形态的紧凑度、人口分布的集聚程度、建设用地开发与利用的效率3个方面的特征表现具有较高的共识。① 最外显的特征是空间形态的不规则、不连续和分散,尤其是跳跃式城市空间扩张,代表了许多迅速扩张的郊区和城市边缘地带的开发特征^[31, 33-34]。② 人口集聚度低,具体表现为单位面积土地上居民点的数量、居住人口或就业人数等各种城市人口的低密度分布情形^[3, 28]。③ 建设用地利用低效^[26-27],具体表现为城市建设用地(尤其是经营性用地)的经济产出低。在城镇化高质量发展的目标下,土地利用效率高是是影响城镇化质量的关键因素,如何让有限的空间资源发挥更大的经济效用是各地国土空间管理的重要任务,因此,城市蔓延的第3个特征也将越来越受重视。

归纳上述3个最具共识度的城市蔓延内涵,本文将城市蔓延定义为一种无序、低密度、低效的城市空间开发模式。基于此定义,本文从空间紧凑度、人口集聚度、建设用地效率3个特征层面选取指标,采用多维测度方法对中国主要大城市的城市蔓延程度进行定量评价。尽管多维指标测度需要克服数据不易获取、指标复合方法选取等难题,但相比简洁却不全面的单一指标测度,多维指标测度能更准确地反映城市蔓延的复杂内涵,提供多样化的决策支持,应用价值更高。综合考虑指标代表性、涵盖全面性、数据获取性等原则,本文选择了9个指标来构建城市蔓延测度指标体系,具体如表1所示。其中,空间紧凑度一级指标选取了景观形状指数、斑块平均最近邻距离、分离度3个二级指标,形状指数反映城市建设用地斑块形状的不规则、破碎度,分离度指数表征建设用地分散度,最近邻距离反映城市建成区组团之间的分布距离。人口聚集度一级指标选取户籍人口密度、常住人口密度和从业人口密度3个二级指标。建设用地效率一级指标选取地均GDP、地均二三产业产值、地均财政收入3个二级指标。

表1 城市蔓延测度指标体系

Tab. 1 The index system for urban sprawl measurement

一级指标	二级指标	二级指标方向	说明
空间紧凑度	景观形状指数(X_1)	正向	$LSI = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{4 \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i}}$, p_i 和 a_i 分别为第 i 个建设用地斑块的周长和面积; n 为建设用地斑块数(下同)。
	平均最近邻距离(X_2)	正向	$MNN = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$, d_i 为第 i 个建设用地斑块与最近邻建设用地斑块间的欧氏距离。
	分离度(X_3)	正向	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2}$, a_i 为第 i 个建设用地的面积; A 为建设用地总面积。
人口聚集度	户籍人口密度(X_4)	负向	户籍人口/建设用地面积
	常住人口密度(X_5)	负向	常住人口/建设用地面积
	从业人口密度(X_6)	负向	从业人口/建设用地面积
建设用地效率	地均GDP(X_7)	负向	市辖区GDP/建设用地面积
	地均二三产值(X_8)	负向	市辖区二三产值/建设用地面积
	地均财政收入(X_9)	负向	市辖区财政收入/建设用地面积

2.2 数据处理

数据处理流程与技术框架如图1所示,研究数据主要包括城市建设用地空间数据、人口和经济统计数据3类。其中,城市建设用地空间分布数据利用2014年的Landsat 8卫

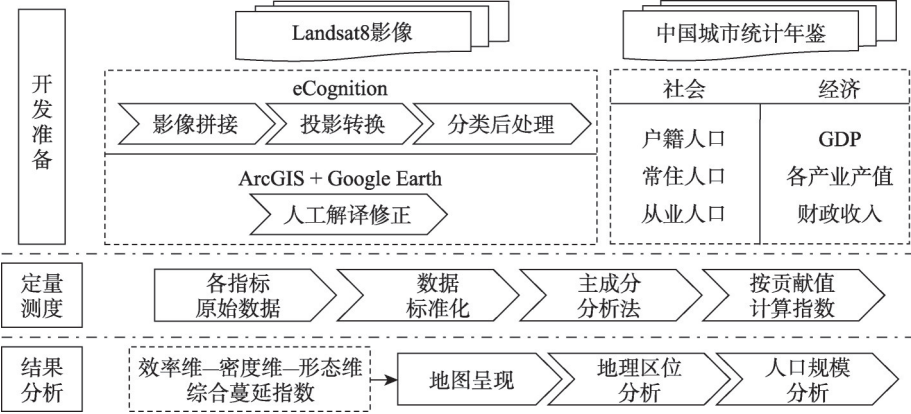


图1 城市蔓延指数开发的数据与方法
Fig. 1 Data and methods for the development of urban sprawl index

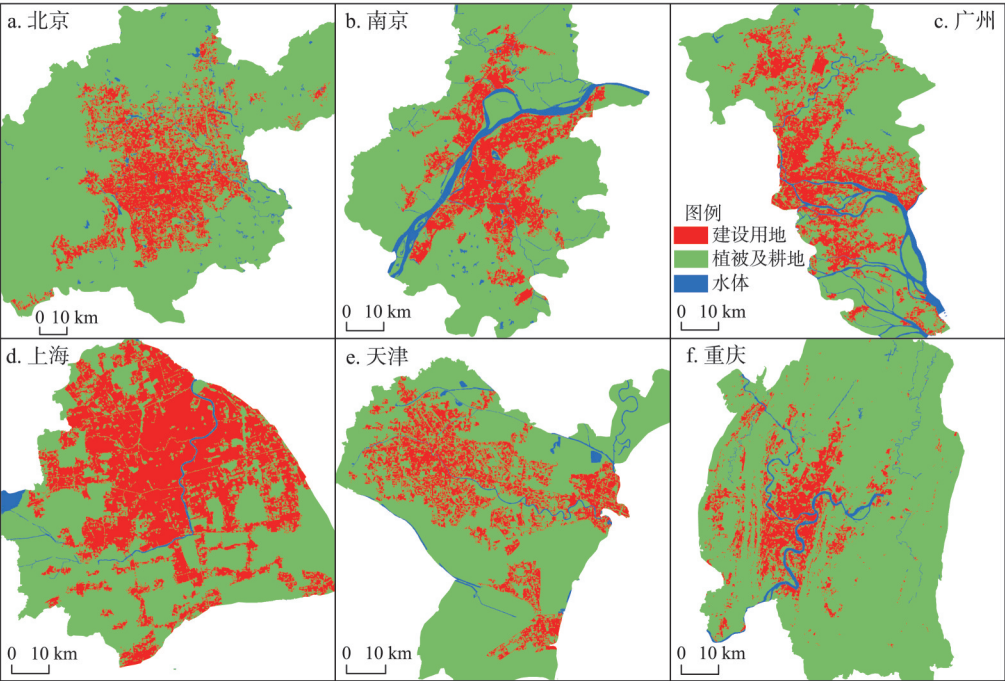


图2 2014年部分城市Landsat 8遥感影像解译结果
Fig. 2 Land use interpretation results of Landsat 8 remote sensing images of several major cities in 2014

星的陆地成像仪 (OLI) 产生的多光谱影像解译获得，部分城市解译结果如图2所示。首先，在ENVI平台上进行对遥感影像的大气校正、统一坐标系统、影像拼接和裁剪等预处理。其次，土地利用分类解译采用监督和非监督分类结合、人工目视辅助修正的方法。通过面向对象的分类软件eCognition平台，将各城市市辖区内的用地类型初步解译为建设用地、农用地和水体，再结合Google Earth平台的高分辨率影像比对修正。最后，为检验解译结果的精确度，将解译得到的城市建设用地面积和2015年《中国城市统计年鉴》中各城市市辖区建成区面积进行皮尔逊相关性检验。二者相关系数达到0.92，

且在0.01水平上显著,说明解译精度相对稳定,满足相关精度要求,可以用于进一步空间紧凑度指标的计算。此外,人口、经济统计数据来源于2015年《中国城市统计年鉴》,用于计算人口聚集度和建设用地效率。

2.3 主成分分析

在多维指标的复合中常用的权重确定方法有德尔菲法、熵值法、层次分析法等,但是这些方法基本上都不能很好地处理指标含义相互重叠的问题^[35],也无法突出特征指标的现实含义。基于对多维指标体系的降维和去相关考虑,本文采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)对数据进行处理,在尽可能多地保留指标的信息载荷的同时,又能最大程度使彼此相互独立^[36-37],从而保证指标复合的客观性。依据主成分分析法的原理,其计算的主要步骤如下:①通过SPSS 20.0软件对原始数据进行标准化处理;②判断原变量是否适用主成分分析法提取因子,Bartlett球度检验统计量观测值为1003.332,在显著性水平为0.05的情况下应拒绝原假设,同时KMO度量值为0.664,根据Kaiser标准可知适合进行因子分析;③建立相关系数矩阵*R*及相应特征向量 λ ,计算各指标方差贡献率和累计贡献率;④选择特征值大于1的3个成分为主成分变量,累计贡献率为74.133%,主成分变量基本反映了原变量的主要信息;⑤根据标准化后的指标数据、主成分特征值、主成分相应载荷值计算得到主成分值;⑥以各主成分的方差贡献率为权数与各主成分值进行线性加权求和,得到综合城市蔓延指数。具体公式如下:

$$Q_{ij} = \sqrt{\lambda_j} P_{ij} \tag{1}$$

$$W_i = \sum_{j=1}^k (\lambda_j Q_{ij}) \tag{2}$$

式中: P_{ij} 表示第*i*个城市第*j*个未旋转因子的得分; Q_{ij} 表示第*i*个城市第*j*个主成分得分, W_i 表示第*i*个城市的综合蔓延指数; λ_j 表示第*j*个因子的方差贡献率。

3 城市蔓延测度结果

3.1 主成分分析结果

由表2可知,第一主成分综合原始数据信息的能力最强,其特征值远大于第二主成分,方差贡献率达41.296%。第一主成分中系数最大的指标为建设用地效率指标($X_7 \sim X_9$),因此可以被解释为效率维特征。第二主成分方差贡献率为20.489%,其中人口集聚度指标($X_4 \sim X_6$)系数最大,可以被解释为密度维特征。第三主成分的方差贡献率为12.348%,其中空间形态紧凑度指标(X_2 和 X_3)系数最大,可以被解释为形态维特征。主成分矩阵出现负数,通过数据平移进行非负化处理。根据各主成分方差贡献值,进行加权复合得到106个重点城市的综合蔓延指数。

3.2 效率维蔓延指数

第一主成分受地均GDP、地均二三产值、地均财政收入3个指标影响最大,主要

表2 各主成分特征值与方差贡献率
Tab. 2 The contribution rates and characteristic values of principal components

指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分
X_1	0.489	-0.574	-0.143
X_2	-0.328	0.218	0.596
X_3	-0.053	0.506	0.651
X_4	0.113	0.838	-0.422
X_5	0.603	0.682	-0.216
X_6	0.772	0.126	0.026
X_7	0.923	-0.043	0.174
X_8	0.924	-0.069	0.170
X_9	0.830	-0.144	0.169
特征值	3.717	1.844	1.111
方差贡献率(%)	41.296	20.489	12.348
累计贡献率(%)	41.296	61.785	74.133

反映经济效率维的城市蔓延指数（图3）。效率维蔓延指数（第一主成分）总体平均值为1.893，地均GDP的平均值为7.19亿元/km²，地均财政收入为0.74亿元/km²。该主成分值越小，代表在效率维度上城市蔓延程度越低，土地经济产出越高。效率维蔓延指数最小的10个城市分别为深圳、广州、珠海、北京、成都、湘潭、南昌、杭州、厦门、福州，平均地均GDP为13.01亿元/km²，这些城市大多分布在沿海发达地区。与之相反，效率维蔓延指数最高的10个城市是临沂、拉萨、德州、鸡西、秦皇岛、辽阳、鹤岗、银川、牡丹江、齐齐哈尔，平均地均GDP为2.64亿元/km²，这些城市大多位于东北地区。随着东北地区资源枯竭、资源型经济逐渐没落，政府希望通过大量出让土地、建设开发区等方法招商引资振兴经济，城市规模不断增大，然而却使得效率维度的城市蔓延更加严重。

3.3 密度维蔓延指数

第二主成分受户籍人口密度、常住人口密度等指标影响最大，主要反映密度维城市蔓延指数（图4）。密度维蔓延指数（第二主成分）平均值为0.927，户籍人口密度和常住人口密度的平均值分别为7961人/km²和9439人/km²。天津、成都、枣庄、南阳、郑州、广州、黄石、淮南、大同、湛江等10个城市密度维蔓延指数最低，其常住人口密度的平均值高达13465人/km²。密度维蔓延指数大于1.2的城市包括齐齐哈尔、拉萨、佛山、烟台、德州、东营、威海，其常住人口密度的平均值较低，仅5574人/km²。常住人口密度小于户籍人口密度的城市有24个，包括荆州、鹤岗、辽阳、新乡、拉萨、淄博、唐山、烟台、丹东、大庆等，表明这些城市具有一定程度的人口流失。

3.4 形态维蔓延指数

第三主成分受平均最近邻距离和分离度两个指标的影响最大，主要代表形态维城市蔓延指数（图5）。106个重点城市的形态维城市蔓延指数（第三主成分）总体平均值为



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)2886号的标准地图制作，底图无修改。

图3 2014年中国重点城市效率维蔓延指数

Fig. 3 The efficiency sprawl index of major cities in China in 2014



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)2886号的标准地图制作,底图无修改。

图4 2014年中国重点城市密度维蔓延指数

Fig. 4 The density sprawl index of major cities in China in 2014



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)2886号的标准地图制作,底图无修改。

图5 2014年中国重点城市形态维蔓延指数

Fig. 5 The morphology sprawl index of major cities in China in 2014

0.504。有6个城市的形态维蔓延指数大于0.8，包括伊春、江门、枣庄、珠海、齐齐哈尔、汕头。其中，伊春是形态维蔓延指数最大的城市，作为一个典型的资源型城市，伊春市近年来出现了人口的净减少，而在城市空间形态上仍然表现为蔓延特征。类似的资源型城市，受自然资源分布的影响，城市形态呈多组团结构，且较为分散，大多具有较高的形态维蔓延指数。深圳是第三主成分值最低的城市，上海、东莞、广州、长沙、苏州、北京等城市的第三主成分值也都明显低于大部分城市，说明这些城市空间形态布局相对紧凑、集约。

3.5 综合城市蔓延指数

106个重点城市的综合蔓延指数如图6所示，总体平均值为1.034。综合蔓延指数超过1.3的城市有临沂、拉萨、齐齐哈尔、德州、伊春5个，综合蔓延指数低于0.8的城市有7个，包括深圳、广州、成都、天津、北京、湘潭、南昌，其余城市则相对均匀地分布在0.8~1.3的区间。从综合蔓延指数的构成来看，第一主成分（效率维）、第二主成分（密度维）、第三主成分（形态维）加权后的均值分别为0.782、0.189、0.062，说明效率维的短板效应最突出、影响最大，而形态维短板的影响范围相对较小，密度维则居于二者之间。第一主成分加权后大于0.9的有临沂、拉萨、德州、鸡西、秦皇岛、辽阳、鹤岗、银川、牡丹江、齐齐哈尔、保定、安阳、潍坊、阜新、佳木斯、徐州等16个城市，说明这些城市在3个维度中效率维短板最明显；第二主成分加权后大于0.25的城市主要包括齐齐哈尔、拉萨、佛山、烟台、德州、东营等，说明密度维短板相对明显；第三主成分蔓延指数加权后大于0.1的有伊春、汕头、齐齐哈尔、珠海、枣庄、江门等6个城市，说明这些城市形态维上短板效应较突出。

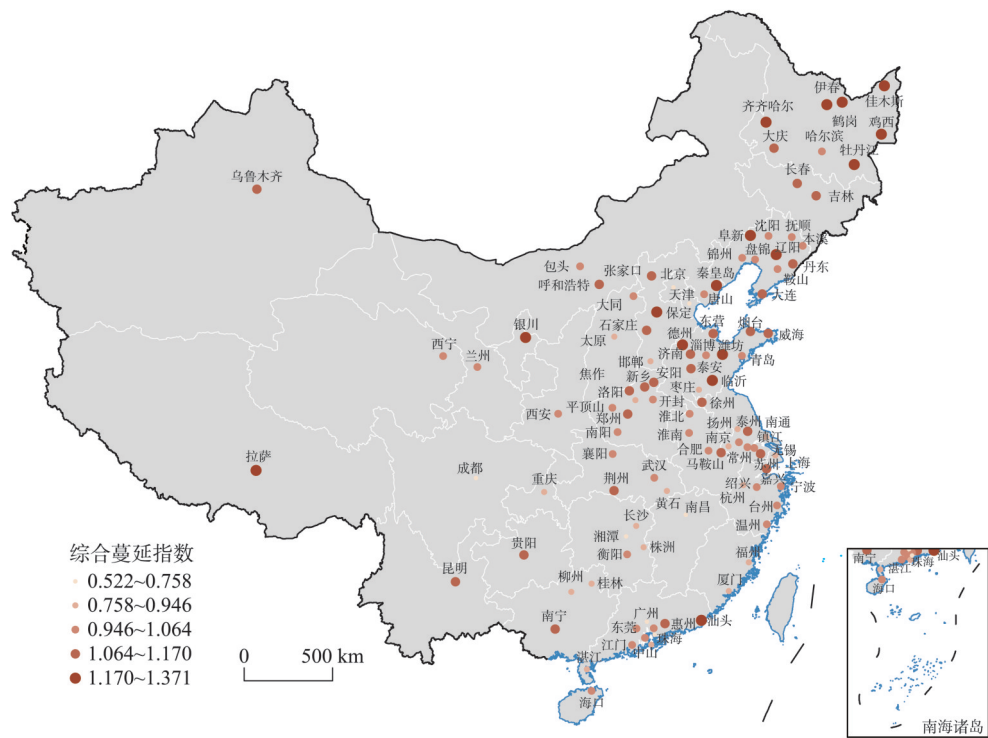


图6 2014年中国重点城市综合蔓延指数

Fig. 6 Comprehensive sprawl index of major cities in China in 2014

4 讨论

4.1 地理区位与城市蔓延

本文将106个重点城市按地理区位划分成7个地区（表3）。根据地理探测器模型中分异及因子探测公式计算^[38]，探测地理分区因子的 q 值为0.134，不同区位的城市蔓延指数分异较为明显（表4）：①东北地区是城市蔓延最严重的地区，综合城市蔓延指数平均值为1.132，有75%的城市综合蔓延指数高于106个城市的平均值。东北地区城市在3个维度短板均比较突出，显著高出总体平均值。②西北地区和华中地区都在效率维表现出较明显的短板，典型城市如银川、安阳、平顶山等，这两个地区在另两个维度上趋势也基本相同，密度维和形态维都略低于总体平均值。③华南地区城市发展最集约但同时又最分散，其形态维蔓延指数平均值在所有地区中最高（0.579），而效率维蔓延指数的平均值却是所有地区中最低的（1.641）。正是由于效率维的长板补足了其在形态维的短

表3 中国106个重点城市的地理分区
Tab. 3 Geographical divisions of 106 major cities in China

地理分区	城市数量(个)	城市名称
东北地区	20	鞍山、本溪、长春、大连、大庆、丹东、抚顺、阜新、哈尔滨、鹤岗、鸡西、吉林、佳木斯、锦州、辽阳、牡丹江、盘锦、齐齐哈尔、沈阳、伊春
华北地区	12	包头、保定、北京、大同、邯郸、呼和浩特、秦皇岛、石家庄、太原、唐山、天津、张家口
华东地区	34	常州、德州、东营、福州、杭州、合肥、淮北、淮南、济南、嘉兴、临沂、马鞍山、南昌、南京、南通、宁波、青岛、厦门、上海、绍兴、苏州、台州、泰安、泰州、威海、潍坊、温州、无锡、徐州、烟台、扬州、枣庄、镇江、淄博
华南地区	14	东莞、佛山、广州、桂林、海口、惠州、江门、柳州、南宁、汕头、深圳、湛江、中山、珠海
华中地区	16	安阳、新乡、焦作、平顶山、荆州、南阳、开封、洛阳、襄阳、武汉、黄石、衡阳、株洲、长沙、郑州、湘潭
西北地区	5	兰州、乌鲁木齐、西安、西宁、银川
西南地区	5	成都、重庆、贵阳、昆明、拉萨

表4 2014年不同地区的城市蔓延指数
Tab. 4 Average urban sprawl index of different regions in China in 2014

地理区位		东北	华北	华东	华南	华中	西北	西南	总体
第一主成分 效率维	最大值	2.357	2.342	2.650	2.067	2.237	2.309	2.496	2.650
	最小值	1.775	1.210	1.389	0.814	1.297	1.778	1.249	0.814
	平均值	2.087	1.908	1.865	1.641	1.883	2.015	1.897	1.893
	标准差	0.188	0.332	0.275	0.404	0.238	0.203	0.515	0.314
第二主成分 密度维	最大值	1.389	1.146	1.291	1.295	1.072	1.115	1.379	1.389
	最小值	0.735	0.443	0.491	0.614	0.537	0.768	0.453	0.443
	平均值	0.970	0.871	0.984	0.933	0.796	0.915	0.909	0.927
	标准差	0.173	0.219	0.189	0.217	0.138	0.148	0.329	0.199
第三主成分 形态维	最大值	1.428	0.628	0.854	1.346	0.737	0.538	0.647	1.428
	最小值	0.287	0.278	0.205	0.000	0.246	0.347	0.350	0.000
	平均值	0.577	0.443	0.451	0.579	0.540	0.450	0.439	0.504
	标准差	0.253	0.120	0.148	0.338	0.123	0.078	0.120	0.202
综合蔓延 指数	最大值	1.352	1.237	1.372	1.223	1.169	1.225	1.356	1.372
	最小值	0.968	0.733	0.758	0.523	0.747	0.958	0.661	0.523
	平均值	1.132	1.021	1.027	0.940	1.007	1.075	1.024	1.034
	标准差	0.112	0.163	0.136	0.201	0.114	0.104	0.267	0.155

板，华南地区城市综合蔓延指数的平均值最终成为所有地区中最小的，仅为0.940。典型城市代表是珠海市，其形态维蔓延指数大小在106个城市中按从大到小排第4位，密度维排名第8位，但由于其效率维蔓延指数较小（排104位），最终使综合蔓延指数仅为0.822，在所有城市中排第98位，是全国蔓延程度较低的城市。

此外，各地区内部差异也十分显著。效率维蔓延度在华北、华南、西南地区内部分异较大，其中西南地区城市效率维蔓延度的分异是最大的，其效率维蔓延指数标准差达0.515。西南地区城市密度维蔓延度的分异也较大，密度维蔓延指数标准差高达0.329，密度维蔓延指数最大和最小的城市都分布在西南地区（分别为拉萨和成都）。华南、东北地区城市形态维蔓延度分异较大，这与该地区既有城市形态较紧凑的城市（如深圳、吉林、丹东），同时又有形态较分散的城市（如汕头、珠海、伊春、齐齐哈尔）有关。

4.2 人口规模与城市蔓延

将106个重点城市按市区人口数量划分成5类，其中1000万及以上的5个超大城市2014年市辖区建设用地面积平均值为1378.39 km²，500万及以上且1000万以下的12个特大城市建设用地面积平均值为709.11 km²，300万及以上且500万以下的19个大城市建设用地面积平均值为437.16 km²，100万及以上且300万以下的54个大城市建设用地面积平均值为206.03 km²，50万及以上且100万以下的16个中等城市建设用地面积平均值为93.72 km²。不同人口规模的城市蔓延指数差异十分显著（表5）。

（1）超大城市整体城市蔓延水平显著低于其他规模的城市。5个超大城市综合蔓延指数平均值为0.684，标准差为0.139，最大为上海的0.858。在各个维度，超大城市的平均值都是5类人口规模城市中最低的。

（2）特大城市综合蔓延水平高于超大城市，但低于其他3类人口规模相对较小的城市。综合蔓延指数平均值为0.960，成都、杭州、郑州、南京等城市综合蔓延指数较低，而汕头、苏州、佛山等城市综合蔓延程度相对较高，主要的短板在于形态维，形态维蔓延指数平均值为0.504，高于大城市I型的平均形态维指数。

表5 2014年不同人口规模的城市蔓延指数
Tab. 5 Average urban sprawl index of various population sizes in 2014

城市规模		超大城市 (1000万以上)	特大城市 (500万~1000万)	大城市I型 (300万~500万)	大城市II型 (100万~300万)	中等城市 (50万~100万)	总体
第一主成分 效率维	最大值	1.584	2.062	2.181	2.650	2.496	2.650
	最小值	0.814	1.249	1.434	1.114	1.297	0.814
	平均值	1.206	1.734	1.893	1.935	2.086	1.893
	标准差	0.317	0.248	0.221	0.263	0.300	0.314
第二主成分 密度维	最大值	1.023	1.295	1.172	1.389	1.379	1.389
	最小值	0.443	0.453	0.719	0.491	0.625	0.443
	平均值	0.773	0.887	0.952	0.932	0.958	0.927
	标准差	0.238	0.237	0.133	0.208	0.190	0.199
第三主成分 形态维	最大值	0.378	1.346	0.544	1.029	1.428	1.428
	最小值	0.000	0.219	0.246	0.277	0.350	0.000
	平均值	0.221	0.504	0.390	0.543	0.593	0.504
	标准差	0.139	0.303	0.087	0.157	0.242	0.202
综合蔓延 指数	最大值	0.858	1.223	1.165	1.372	1.356	1.372
	最小值	0.523	0.661	0.800	0.758	0.747	0.523
	平均值	0.684	0.960	1.025	1.057	1.131	1.034
	标准差	0.139	0.145	0.095	0.126	0.154	0.155

(3) 大城市综合蔓延水平居于特大城市和中等城市中间。其中, 大城市II型整体呈现蔓延趋势, 综合蔓延指数平均值为1.057。并且, 大城市II型内部极化现象明显, 既存在高蔓延程度的城市如临沂、齐齐哈尔、德州、秦皇岛、银川、保定等, 也有低蔓延程度的城市如南昌、珠海、柳州等。

(4) 中等城市综合蔓延水平最高, 且单个维度蔓延指数平均值也最高, 其形态维蔓延指数平均值为0.593, 密度维蔓延指数平均值为0.958, 效率维蔓延指数平均值为2.086, 综合蔓延指数为1.131, 是蔓延程度最严重的一组。

综上可见, 综合蔓延指数与城市规模存在一定的关系, 城市规模越大, 其平均综合蔓延指数则越小, 即城市整体表现越不蔓延。尤其是密度维和效率维蔓延指数与城市人口规模的负向关系显著, 城市人口规模越大, 密度维和效率维蔓延则越小。全国一线特大城市和东部沿海地区的大城市, 由于在密度维和效率维两个方面表现优异, 最后的综合蔓延指数较低。城市规模与综合蔓延指数分布的散点图(图7)也表明, 106个重点城市总体上表现出城市人口规模越大、蔓延指数越小的特征, 说明规模较大城市的蔓延程度要明显低于规模较小的城市, 进一步印证了城市蔓延与人口规模之间的负相关性。

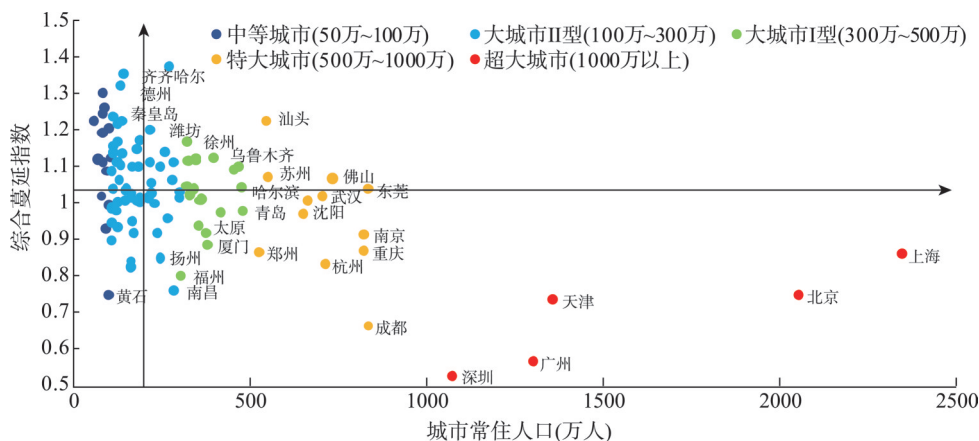


图7 2014年中国城市规模与综合蔓延指数散点图

Fig. 7 Scatter plot of urban scale and comprehensive sprawl index in 2014

5 结论

本文尝试构建了一个既能准确表达城市蔓延多维复杂内涵, 又与城镇化质量紧密关联、能满足中国城市管理需求的城市蔓延指数。基于空间紧凑度、人口聚集度、建设用地效率等指标, 采用主成分分析法计算全国106个重点城市的综合蔓延指数, 主要结论为:

(1) 面对城市蔓延复杂的特征内涵, 主成分分析法实现了降维与确定主成分的贡献度。在本研究中, 根据指标贡献率, 第一主成分主要表征效率维蔓延度, 第二主成分主要表征密度维蔓延度, 第三主成分主要表征形态维蔓延度, 这印证了本文对城市蔓延的基本定义。效率维蔓延指数对综合蔓延指数贡献最大, 密度维蔓延指数的贡献率仅次于效率维, 反映出对于城市蔓延现状的认识, 不再一味偏重空间形态扩张, 而更加关注扩张效率和密度。这也与更加重视城镇化发展质量的国土空间治理的新要求相匹配。

(2) 多维测度能够更系统、综合地反映城市蔓延水平。由于城市发展的不均衡性, 每个城市可能会在某个维度上存在短板。特别是效率维度的短板效应最为突出, 因其对

综合蔓延指数的贡献率最大,使得大多数经济落后的城市在综合蔓延度排序中居于高位。如果不对多个维度的表现进行综合考虑,就容易以偏概全。多维综合测度能实现长短板互补,克服单一维度的片面性,这对于科学制定城市用地指标分配等相关分类指导政策具有重要现实意义。

(3) 不同维度城市蔓延指数空间分布差异明显,综合蔓延指数与城市规模整体呈现负相关关系。形态维蔓延指数分布规律较复杂,与城市规模之间不存在显著的相关关系。而密度维、效率维蔓延指数与城市规模存在显著的负相关关系,规模越大、经济发展越快的城市,城市人口密度和建设用地使用效率较高,蔓延程度相对低;而规模越小、经济相对落后的城市则相对更加蔓延。因此,本文制定的城市蔓延指数在一定程度上适宜表征城镇化质量,综合蔓延程度越高的城市也是城镇化质量亟待提升的重点地区。

本文存在一些不足:①城市蔓延的概念与内涵具有复杂性,仅在特定语境下界定城市蔓延的定义是一种无序、低密度、低效率的城市空间开发模式;②城市蔓延的动态性已得到学界关注,但由于对大样本量城市开展遥感影像解译的工作量巨大,本文仅在2014年时点上测度了106个重点城市的城市蔓延程度,缺少不同时序的纵向比较。相对本文的静态蔓延指数,动态蔓延指数的价值和意义更高,因此,在未来数据允许的条件下,应进一步开展对大样本案例的多时序对比分析,以实现从时空多尺度揭示中国城市蔓延的演变规律,为中国国土空间治理提供更加系统的决策支撑。

参考文献(References)

- [1] Ewing R. Characteristics, causes, and effects of sprawl: A literature review. *Environmental and Urban Issues*, 1994, 21(2): 1-15.
- [2] Galster G, Hanson R, Ratcliffe M R, et al. Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 2001, 12(4): 681-717.
- [3] Frenkel A, Ashkenazi M. Measuring urban sprawl: How can we deal with it. *Environment & Planning B Planning & Design*, 2008, 35(1): 56-79.
- [4] Harvey R O, Clark W. The nature and economics of urban sprawl. *Land Economics*, 1965, 41(1): 1-9.
- [5] Burchell R, Shad N, Listokin D, et al. The Costs of Sprawl-Revisited. Report 39. Washington, DC: Transit Cooperative Research Program. Transportation Research Board, National Research Council, 1998.
- [6] Brueckner J K. Urban sprawl: Diagnosis and remedies. *International Regional Science Review*, 2000, 23(2): 160-171.
- [7] Schweitzer L, Zhou J. Neighborhood air quality, respiratory health, and vulnerable populations in compact and sprawled regions. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 363-371.
- [8] Stone B, Hess J J, Frumkin H. Urban form and extreme heat events: Are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(10): 1425-1428.
- [9] Ewing R, Hamidi S, Grace J B, et al. Does urban sprawl hold down upward mobility. *Landscape & Urban Planning*, 2016, 148: 80-88.
- [10] He J, Liu Y, Yu Y, et al. A counterfactual scenario simulation approach for assessing the impact of farmland preservation policies on urban sprawl and food security in a major grain-producing area of China. *Applied Geography*, 2013, 37(1): 127-138.
- [11] Saravanan P, Ilango P. Identification of urban sprawl pattern for Madurai region using GIS. *International Journal of Geomatics & Geosciences*, 2010(2): 141-149.
- [12] Sperandelli D I, Dupas F A, Pons N A D. Dynamics of urban sprawl, vacant land, and green spaces on the metropolitan fringe of São Paulo, Brazil. *Journal of Urban Planning & Development*, 2013, 139(4): 274-279.
- [13] Ujoh F, Kwabe I D, Ifatimehin O O. Understanding urban sprawl in the federal capital city, Abuja: Towards sustainable urbanization in Nigeria. *Environment & Planning A*, 2010, 3(5): 106-113.
- [14] Hamidi S, Ewing R. A longitudinal study of changes in urban sprawl between 2000 and 2010 in the United States. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 128(3): 72-82.
- [15] Lyu Tianguai, Wu Cifang, Li Hongyi, et al. The coordination and its optimization about population and land of

- urbanization: A case study of Nanchang City. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 239-246. [吕添贵, 吴次芳, 李洪义, 等. 人口城镇化与土地城镇化协调性测度及优化: 以南昌市为例. *地理科学*, 2016, 36(2): 239-246.]
- [16] Fulton W, Pendall R, Nguyen M, et al. *Who Sprawls Most? How Growth Patterns Differ across the U.S.* Washington, DC: Brookings Institution, Center on Urban and Metropolitan Policy, 2001.
- [17] Whyte W H. *The Exploding Metropolis*. New York: Doubleday, 1958: 133-156.
- [18] Gottmann J. *Megalopolis: The Urbanized Northeastern Seaboard of the United States*. New York: The Twentieth Century Fund, 1961: 13-25.
- [19] Anderson W P, Kanaroglou P S, Miller E J. Urban form, energy and the environment: A review of issues, evidence and policy. *Urban Studies*, 1996, 33(1): 7-36.
- [20] Dutton J A. *New American Urbanism: Reforming the Suburban Metropolis*. London: Distributed Elsewhere by Thames & Hudson, 2000: 15-27.
- [21] Soule D C. *Urban Sprawl: A Comprehensive Reference Guide*. Westport, CT: Greenwood Press, 2006: 3-11.
- [22] Batty M, Longley P. *Fractal Cities a Geometry of Form and Function*. San Diego, CA: Academic Press Professional, Inc, 1994: 30-55.
- [23] Fulton W. *The New Urbanism*. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 1996: 1-7.
- [24] Burton E. The compact city: Just or just compact? A preliminary analysis. *Urban Studies*, 2000, 37(11): 1969-2006.
- [25] Ewing R, Pendall R, Chen D D T. Measuring sprawl and its impact. *Smart Growth America*, 2002, 57(2): 320-326.
- [26] Zeng Chen. Multi Level-Dimension Measurement and Multi Scale-Strategy Spatial Regression Modeling for Urban Sprawl. Beijing: Science Press, 2016: 45-57. [曾晨. 城市蔓延的多层次多维度测度和多尺度多策略空间回归建模. 北京: 科学出版社, 2016: 45-57.]
- [27] Zhang Linlin. Research on the urban sprawl in transitional China: Multi-scale measurement, mechanism, and remedies [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [张琳琳. 转型期中国城市蔓延的多尺度测度, 内在机理与管控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [28] Lopez R, Hynes H P. Sprawl in the 1990s measurement, distribution, and trends. *Urban Affairs Review*, 2003, 38(3): 325-355.
- [29] Gao B, Huang Q, He C, et al. How does sprawl differ across cities in China? A multi-scale investigation using nighttime light and census data. *Landscape & Urban Planning*, 2016, 148(41): 89-98.
- [30] Wang Jiating, Zhang Juntao. Measurement on the urban spreading in China: Empirical study based on the panel data of 35 large and middle cities. *Economist*, 2010(10): 56-63. [王家庭, 张俊韬. 我国城市蔓延测度: 基于35个大中城市面板数据的实证研究. *经济学家*, 2010(10): 56-63.]
- [31] Yue W, Liu Y, Fan P. Measuring urban sprawl and its drivers in large Chinese cities: The case of Hangzhou. *Land Use Policy*, 2013, 31(31): 358-370.
- [32] Jiang Fang, Liu Shenghe, Yuan Hong. Measuring urban sprawl in Beijing with geo-spatial indices. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(6): 649-658. [蒋芳, 刘盛和, 袁弘. 北京城市蔓延的测度与分析. *地理学报*, 2007, 62(6): 649-658.]
- [33] Xu C, Liu M, Zhang C, et al. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, 2007, 22(6): 925-937.
- [34] Zhang Linlin, Yue Wenzhe, Fan Beilei. Measuring urban sprawl in large Chinese cities: A case study of Hangzhou. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(4): 394-400. [张琳琳, 岳文泽, 范蓓蕾. 中国大城市蔓延的测度研究: 以杭州市为例. *地理科学*, 2014, 34(4): 394-400.]
- [35] Yang Yu. Analysis of weighting methods in multi-index comprehensive evaluation. *Statistics & Decision*, 2006(13): 17-19. [杨宇. 多指标综合评价中赋权方法评析. *统计与决策*, 2006(13): 17-19.]
- [36] Zhang Yaoting. *Lecture Notes of Multiple Statistical Analysis*. Beijing: China Statistics Press, 2003. [张尧庭. 多元统计分析选讲. 北京: 中国统计出版社, 2003.]
- [37] Gao Huixuan. *Application of Multivariate Statistical Analysis*. Beijing: Peking University Press, 2005. [高惠璇. 应用多元统计分析. 北京: 北京大学出版社, 2005.]
- [38] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]

Developing an urban sprawl index for China's mega-cities

YUE Wenze^{1,2}, WU Tong¹, LIU Xue¹, ZHANG Linlin³, WU Cifang^{1,2},

YE Yanmei^{1,2}, ZHENG Guozhou⁴

(1. Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou, 310058, China; 2. Laboratory for Saving and Intensive Utilization of Urban and Rural Construction Land by Ministry of Natural Resources, Beijing 100812, China; 3. Department of Urban-rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 4. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Urban sprawl has become a global phenomenon. There is, however, no consensus on the connotation of urban sprawl, which still remains subjective to controversy and ambiguity. In this paper, urban sprawl was defined as an inefficient, low-density and disordered mode of urban space development. The definition includes three of the most recognized characteristics of urban sprawl summarized from previous studies. Characterized by the features mentioned above, urban sprawl has been recognized as an important challenge to the high-quality development of cities in China. Therefore, to build an urban sprawl index that can reflect the quality of urbanization is of significance to macro-micro regulation of urban sprawl. Multiple metrics representing the core characteristics of urban sprawl were selected as measuring indexes, based on satellite images and socio-economic statistical data. Furthermore, in order to make the results more objective and comparable, the method of principal component analysis was applied to calculate the comprehensive sprawl index. Finally, 106 of China's mega-cities were chosen as cases, and the degree of urban sprawl of each city was measured for the year 2014. As shown from the results, the first principal component mainly reflected the dimension of economic efficiency, contributing 41.30% to the comprehensive sprawl index. The second principal component mainly represented the dimension of population density, followed by the third principal component that described morphological dimension. It is noteworthy that, because the short board effect of economic efficiency dimension was significant, many less-developed cities were ranked to a high sprawling level. In addition, the spatial distribution of different dimensions of urban sprawl index were distinct. Population density and land use efficiency were generally consistent with each other, while the distributing law of city form showed distinguishing features. Last but not least, the comprehensive sprawl index had a certain negative correlation with city scale, which reminds us to pay more attention to urban sprawl in medium-sized cities in the future.

Keywords: urban sprawl index; measurement; spatial morphology; density; efficiency