基于 30m 地表覆盖数据的城市扩张测度方法

于溪^①, 张冰琦^①, 李强^{①*}, 陈晋^②

① 北京师范大学资源学院, 北京 100875;

② 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

* 通讯作者, E-mail: liqiang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-09; 接受日期: 2016-02-25; 网络版发表日期: 2016-08-25

国家高技术研究发展计划项目(编号: 2013AA122802)资助

摘要 利用 2000 和 2010 年的全球 30m 分辨率地表覆盖数据, 以我国 320 个地级以上城市为对象, 建立城市扩张强度的对数正态分布拟合模型, 并提出测度城市扩张强度基本特征的峰位置、半峰宽和偏度等参数. 结果表明: 对数正态分布拟合方法能够表征中国城市扩张强度随距离而变化的空间分布规律及其差异, 具有代表性、区分性和一定的鲁棒性与抗干扰能力. 特征参数进一步揭示出不同规模城市扩张的差异性, 即: 规模较大城市具有强烈的向外围扩张趋势, 且扩张强度和影响力高于其他城市, 但大多数城市的扩张发生在距城市中心较近的区域, 影响范围有限; 城市扩张强度及空间延续性与城市原有规模密切相关.

关键词 城市化, 城市扩张, 遥感, 对数正态分布, 特征参数, 全球30m地表覆盖数据

1 引言

为满足城市化带来的人口高度集聚、产业升级转换对土地的需求, 城市扩张已成为城市化在空间上的主要表现形式和必然结果. 但是, 无序的城市扩张会带来土地低效利用、耕地损失、生态退化和环境污染等问题(谈明洪等, 2004), 一定程度上又制约着城市化的健康发展. 改革开放以来, 我国城市化快速发展, 2013年, 城市化率已达53.73%(国家统计局, 2014), 极大地促进了我国区域经济发展和居民生活水平的提高. 但21世纪以来, 城市化成为国家和地方经济过分依赖的增长源, 城市扩张在一定程度出现

了失控状态, 遥感监测表明: 2000~2010年我国城市建成区面积增长了85%(王雷等, 2012). 城市扩张加剧, 其对社会经济和环境的影响日益全面而深刻, 使得城市扩张问题日益受到关注. 因此, 探索城市扩张的测度方法, 进而揭示城市扩张强度的空间分布规律, 对研究城市扩张问题和制定相应的可持续发展土地政策具有十分重要的意义.

遥感具有较高的空间分辨率和一定时段连续观测的能力, 通过遥感数据提取城市土地覆盖/利用及变化信息在一定程度上可以克服常规统计数据存在的主观性、滞后性与高成本等问题, 为城市扩张定量研究提供了可靠的基础数据(卓莉等, 2003; 俞乐等,

中文引用格式: 于溪, 张冰琦, 李强, 陈晋. 2016. 基于 30m 地表覆盖数据的城市扩张测度方法. 中国科学: 地球科学, 46: 1180~1187, doi: 10.1360/N072015-00284

英文引用格式: Yu X, Zhang B Q, Li Q, Chen J. 2016. A method characterizing urban expansion based on land cover map at 30 m resolution. Science China Earth Sciences, 59: 1738~1744, doi: 10.1007/s11430-016-5304-x

2014). 以遥感数据为基础, 研究者们使用了分形维数(Batty等, 1989)、平均斑块面积(Yu和Ng, 2007)、形状指数(王新生等, 2005)、城市用地密度(percentage built-up area)(Jat等, 2008)等测度参数表征城市扩张的空间形态. 在此基础上, 一方面, 一些研究者进一步考虑时间因素, 通过计算上述指标随时间的变化量来刻画城市扩张过程及特点. 其中, 城市扩张强度指数(urban expansion intensity index)是一个被广泛应用的测度参数(Schneider和Woodcock, 2008; Xiao等, 2006; Xu和Min, 2013; 刘盛和等, 2000; 李晓文等, 2003), 它描述的是一定区域面积内城市用地经过一定时间段的增加量, 既可以反映不同区域在同一时间段、也可以反映同一区域在不同时间段的的城市扩张剧烈程度. 李晓文等(2003)等利用该参数对比了上海地区不同时期的城市扩张情况, 指出各时期建成区扩展部分呈圈层状分布. Xu等(2013)计算了中国18个城市的城市扩张强度等参数, 并以此分析了中国东、中、西部城市扩张的时空分布特点. 另一方面, 一些研究者对表征城市扩张的主要参数进行统计拟合或者图解分析(diagrammatic method)(Chen S S等, 2015; Guerois和Pumain, 2008; Jiao, 2015; Tian等, 2011), 以期揭示这些参数随距离城市中心远近而变化的空间分布规律. 例如, Chen S S等(2015)利用图解方法描述了长江三角洲地区51个城市扩张强度随距离城市中心远近的变化特征; Jiao(2015)采用逻辑斯蒂曲线, 对中国28个主要城市的城市用地密度(urban land density)进行拟合, 发现了城市用地密度与距城市中心距离呈反S形变化的规律, 反映了城市用地在中心区域高度聚集、而在外围逐渐呈现零散分布的特征. 但是, 现有研究大部分局限于较小区域或单个城市, 所提出的城市扩张测度参数及其据此建立的城市扩张统计拟合模型, 在较大空间区域是否适用(或成立)并未得到充分的实证; 同时, 这些测度参数在定义、计算方法上也并不一致, 使得进行跨区域、多时段的综合比较研究有一定困难.

在上述工作基础上, 本文利用我国研制的全球30m分辨率地表覆盖分类数据, 以我国320个地级以上城市为对象, 对这些城市2000~2010年间的扩张强度随距城市中心距离而变化的空间分布特征进行统计拟合, 尝试建立统一拟合曲线模型, 并提出刻画该

拟合曲线的特征参数, 以揭示不同规模城市扩张的差异性, 为更好地理解城市扩张时空变化规律提供可行的方法.

2 数据

采用国家基础地理信息中心等研制的全球高分辨率地表覆盖产品(GlobeLand30)(Chen J等, 2015), 该产品与国际上其他全球地表覆盖产品相比较, 具有空间分辨率高(30m)、分类精度高(总体精度>70%)、产品质量在空间和时间上一致性强的特性. 其数据覆盖2000和2010年两个基准年, 包括10个地表覆盖类型, 分别是: 耕地、森林、草地、灌丛地、水体、湿地、苔原、人造地表、裸地、冰川与永久积雪. 其中, 人造地表类型的定义源自联合国粮农组织地表覆盖分类系统(Land Cover Classification System)中的“人造地表及其附属区域”(artificial surface and associated area)类别, 即: 由于人类活动形成的非植被表面. 由于人造地表在相关研究中常被用于刻画城市范围(Sudhira等, 2004), 故本文采用该类型来表征城市用地, 并选取中国320个地级以上城市(含)为研究对象, 其中包括30个省会城市/直辖市.

3 城市扩张测度方法

3.1 城市扩张强度计算与统计拟合

为获取城市扩张信息, 首先, 提取各城市两期GlobeLand30数据中的人造地表覆盖区域. 以图1的北京市为例, 灰色区域为2000年城市用地, 黑色区域为2000~2010年间新增的城市用地.

其次, 借鉴城市形态以及城市扩张等相关研究中广泛采用的同心环分割方法(Ji等, 2006; Seto和Frakias, 2005; Wu等, 2013; 黎夏和叶嘉安, 1997), 以城市中心为圆心, 以1km为间隔, 将城市分割为多个同心环, 并计算各同心环的城市扩张强度. 考虑到所选城市的空间延展范围, 取30km为最大同心环半径, 基本能够覆盖绝大部分所选城市全域. 已有研究中, 最大同心环半径选择随研究对象城市规模的不同而有所差异(Chen S S等, 2015; Jiao, 2015; Schneider和Woodcock, 2008; Tian等, 2011; 姜世国和周一星, 2006), 但均以覆盖对象城市全域为原则, 本研究也遵循该原则.

图1 城市扩张与同心环分割(北京)

城市扩张强度指数是一定时段内的城市用地面积增加量与该区域面积的比值(Xu和Min, 2013). 对于每个同心环 k , 按照下式计算其城市扩张强度 I_k :

$$I_k = \frac{U_k^{t_2} - U_k^{t_1}}{A_k}, \quad (1)$$

式中, A_k 表示第 k 个同心环内各类用地的总面积, $U_k^{t_2}$ 和 $U_k^{t_1}$ 分别表示第 k 个同心环内2000年(t_1)和2010年(t_2)的城市用地面积.

根据各同心环的城市扩张强度计算结果, 可以看出: 城市扩张强度具有在城市中心区较低, 并沿城市中心向外围逐渐增大, 达到最大值后向外围递减的空间分布特征. 鉴于这一变化特征与对数正态分布的类钟形曲线类似, 而且对数正态分布模型已在城市规模与城市位序、数量的关系等研究中得到应用(Eeckhout, 2004; Lee 和 Li, 2013; Luckstead 和 Devadoss, 2014), 故选取对数正态分布曲线对城市扩张强度进行拟合. 如式(2)所示, 该曲线的形状取决于参数 μ 和 σ , 曲线高度由参数 a 控制. 对于每个城市, 将其距城市中心30km范围的所有同心环的扩张强度数据代入对数正态分布函数, 使用多初始值非线性最小二乘法进行拟合(钱政等, 2013), 选取拟合优度 R^2 最大的参数(μ 、 σ 、 a)作为最终结果.

$$f_{(x)} = \frac{a}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0. \quad (2)$$

3.2 城市扩张特征参数提取

在得到320个城市的扩张强度指数随距离而变化的拟合曲线后, 为深入揭示不同城市扩张的同质性和差异性, 进一步提出如下特征参数.

3.2.1 峰位置

如图2所示, 对数正态分布曲线呈钟形, 曲线峰值点对应的横坐标即为峰位置(peak position, X_m), X_m 是城市扩张强度最大值出现位置到城市中心的距离, 表示城市扩张最为显著区域的空间位置特征. 其计算公式为

$$X_m = e^{\mu - \sigma^2}. \quad (3)$$

3.2.2 半峰宽

如图2所示, 在峰值点纵坐标的1/2处引横轴的平行线, 拟合曲线与该平行线相交两点之间的距离即为半峰宽(full width at half maximum, W). 该参数用来表征城市扩张显著区域的范围大小, 是反映城市扩张的空间影响力的重要标志. 其计算公式为

$$W = e^{\mu - \sigma^2} \left(e^{\sigma\sqrt{2\ln 2}} - e^{-\sigma\sqrt{2\ln 2}} \right). \quad (4)$$

3.2.3 偏度

偏度(skewness, SK)是描述分布偏离对称性程度

图2 城市扩张强度的对数正态曲线拟合及特征参数几何意义($a=2.2$, $\mu=2.2$, $\sigma=0.5$)

的无量纲参数(邓爱珍和丁盈, 2013), 其绝对值越大, 表明偏斜程度越大. 当分布左右对称时, 偏度为0; 当 $SK>0$ 时, 分布呈右偏态(也称正偏态); 当 $SK<0$ 时, 分布为左偏态(也称负偏态). 对数正态分布的偏度均大于0, 呈右偏形态. 该参数可以表征在峰位置两侧城市扩张的对称程度, 对于峰位置相近的城市, 偏度越大, 曲线形状越不对称, 城市扩张的单方向发展能力越强. 其计算公式为

$$SK = (e^{\sigma^2} + 2)\sqrt{e^{\sigma^2} - 1}. \quad (5)$$

4 结果分析

4.1 城市扩张强度拟合结果

图3a显示了全部城市的对数正态分布函数拟合效果. 320个对象城市中, 275个城市(约占86%)的拟合优度 R^2 高于0.5, 177个城市(约占55%)的拟合优度超过0.8, 这说明对数正态分布曲线能够很好地表征中国城市扩张强度随距离而变化的空间分布规律, 具有典型代表性.

图3b~e是城市扩张强度拟合结果中最具代表性的4种曲线. 图3b和c表现为城市扩张强度先增后减,

图3e表现为单调递减, 图3d则是介于二者间的过渡类型, 说明对数正态分布拟合曲线针对不同城市扩张特点具有良好的区分性, 因此, 在拟合曲线基础上进一步计算峰位置、半峰宽、偏度等特征参数, 可以表征不同特点城市的扩张差异性.

另外, 考察图3b和c的城市扩张强度随距离分布的散点图与拟合曲线, 可以发现, 尽管30km半径的同心环不能完全覆盖图3b的城市扩张范围, 但可以很好地拟合出整体趋势; 而对于图3c, 尽管城市扩张强度数据在20~30km处存在一个扰动(由于2007年所建机场导致), 但该扰动对拟合效果影响不大, 说明对数正态分布拟合方法还具有一定的鲁棒性和抗干扰能力, 能够总体上把握城市扩张强度随距离而变化的空间分布规律.

4.2 城市扩张特征参数计算结果

选取拟合优度 R^2 高于0.5的275个城市(包括27个省会城市/直辖市), 计算城市扩张特征参数及其统计特征量(表1), 并在GIS支持下, 实现各特征参数的空间分布可视化(图4).

由图4和表1可以发现: 省会城市/直辖市扩张的峰位置(平均值为9.82 km)和半峰宽(平均值为

图3 对象城市的对数正态拟合效果及典型拟合曲线

图 4 中国城市扩张特征参数分布图

11.40km)均显著大于其他城市;而另一方面,省会城市/直辖市的扩张强度偏度(均值为1.74)均小于其他城市,说明规模较大、经济高度发达的省会城市/直辖市具有强烈的向外围扩张趋势,在空间上表现出其独特性,即:最为明显的扩张发生在距城市中心较远

表 1 城市扩张特征参数统计量^{a)}

分类	指标	省会城市/直辖市	其他地级市	全部城市
城市数量		27	248	275
峰位置	均值	9.83	3.86	4.45
	方差	3.71	2.83	3.42
	最大值	19.76	21.18	21.18
	最小值	4.60	0.00	0.00
半峰宽	均值	11.40	5.60	6.17
	方差	6.57	5.49	5.86
	最大值	37.57	36.90	37.57
	最小值	2.05	0.00	0.00
偏度	均值	1.74	2.52 [*]	2.43 [*]
	方差	1.04	2.46 [*]	2.36 [*]
	最大值	5.29	20.07 [*]	20.07 [*]
	最小值	0.42	0.21 [*]	0.21 [*]

a) 当 X_m 小于 1km 时,城市扩张强度呈现单调递减趋势. 针对该情况下曲线形状极不对称、偏度系数急速增大的特点,在统计各城市偏度系数时,排除了 X_m 小于 1km 的 22 个地级市

的区域,其影响的空间范围跨度大,在峰位置两侧城市扩张强度对称性程度较高,外延(离心)和内延(向心)扩张并存. 此外,在同类型的地级市中,山区城市(主要分布在青藏高原、云贵高原及其周边区域)表现出三个特征参数均相对较小的特点(图4),这一方面与其经济发展水平相对落后有关,另一方面也可能与其城市扩张受到复杂地形地貌等自然条件限制有关.

进一步综合考虑峰位置和半峰宽两个参数,在二者的散点分布图中(图5),根据两个参数的平均值将275个城市划分为4个类型. 其中,峰位置和半峰宽均小于平均值的城市有141个,占比50%以上;峰位置和半峰宽均大于平均值的城市有62个,占比23%,且22个省会城市/直辖市(除南宁、昆明、福州、拉萨、呼和浩特以外)均属于该类型. 而峰位置小于平均值、但半峰宽大于平均值的城市,以及峰位置大于平均值、但半峰宽小于平均值的城市合计为72个,占比26%. 这一结果说明,我国大多数城市的扩张发生在距城市中心较近的区域,且影响范围有限;而对于规模较大、经济发展水平较高的省会城市/直辖市,进一步验证了前述的特征,即:这些城市向外围扩张的距离较远,而且具有较强的扩张影响力.

4.3 城市扩张与城市原有规模的相关性

上述分析表明城市扩张的强度及空间延续性均与城市原有规模密切相关. 为表征城市规模,定义并

图5 城市扩张的峰位置与半峰宽参数关系散点图

计算了城市规模等效半径参数(郭建国, 2007), 具体步骤如下: 1) 量算2000年各城市的最大连续斑块的面积(A_p), 即能够覆盖城市主体的、连续的人造地表区域. 对于被河流分割而不呈现连续状分布的部分城市, 人为地将河流两岸的分割斑块合并为统一的城市主体. 这里使用最大连续斑块的面积, 可以避免较难确定的城市边界定义. 同时, 最大连续斑块一般包含了城市主体功能区, 可以表达不同城市的相对规模(例如Deng等, 2008). 2) 根据式(6)将2000年的城市主要斑块面积转化等面积圆的半径 R (km), 以此表征其城市相对规模. 等效半径参数与本文提出的城市扩张的特征参数(峰位置、半峰宽)具有同样的计量单位(km), 便于直观地比较分析.

$$R = \frac{\sqrt{A_p / \pi}}{1000}. \quad (6)$$

分别绘制峰位置、半峰宽和偏度参数与城市原有规模等效半径 R 的散点图. 图6a反映出扩张强度峰位置与城市原有规模具有显著的线性正相关关系, 城市原有规模越大, 扩张强度峰位置离城市中心的距离越远, 说明大多数城市的扩张不可避免地受到城市原有规模的影响与制约. 图6b中, 半峰宽与城市原有规模也基本呈现出正相关关系, 但具体关系较为复杂, 可以明显地分为三种类型, 如: 以武汉、深圳为代表的半峰宽随着城市原有规模的增加而平稳增加的类型、以广州、东莞为代表的半峰宽在一定的城市规模变化范围内快速增长的类型、以北京、沈阳为代表的半峰宽在城市规模的较大变化范围内缓慢增长的类型. 形成不同类型的原因复杂多样, 需要在后续的研究中深入挖掘其中的影响因素和作用机制. 图6c中, 偏度随着城市规模的增加呈现出非线性递减的变化趋势, 即城市原有规模越大, 峰位置两侧城市的外延(离心)和内延(向心)扩张对称性增强. 其可能的原因为: 城市原有规模越大, 城市扩张显著区域距离城市中心越远, 影响范围越大, 但继续向外扩张会受到运输成本、通勤距离急剧增大等成本因素制约, 使得向城市中心一定范围内的扩张更具有比较优势, 因而城市扩张强度的分布对称性增强, 偏度减少. 而对于规模较小的城市, 这种成本制约作用不明显, 因而, 偏度与城市规模之间并未呈现明显的规律, 总体拟合效果不理想.

图6 城市扩张特征参数与城市原有规模的相关性

5 讨论与结论

利用全球30m分辨率地表覆盖分类数据产品, 提取了中国320个地级以上城市2000~2010年间的城市扩张强度随距城市中心距离而变化的基础信息, 通过统计拟合的方法, 建立了城市扩张强度的对数正态分布拟合模型, 并提出测度城市扩张强度基本特征参数。主要结论如下。

(1) 对数正态分布曲线能够表征中国城市扩张强度随距离而变化的空间分布规律, 而且针对不同城市扩张特点具有良好的区分性, 同时还具有一定的鲁棒性和抗干扰能力。

(2) 拟合曲线的峰位置、半峰宽、偏度等特征参数, 可以表征不同规模城市扩张特征的差异性。省会城市/直辖市扩张强度的峰位置和半峰宽均显著大于其他城市, 而偏度小于其他城市, 表明规模较大城市具有强烈的向外围扩张趋势, 且扩张强度和影响力高于其他城市; 但我国大多数中小城市的扩张发生在距城市中心较近的区域, 影响范围有限。

(3) 城市扩张强度及空间延续性与城市原有规模密切相关。扩张强度峰位置与城市规模具有显著的线性相关关系; 半峰宽与城市规模的关系较为复杂, 揭示形成二者间不同相关性的原因是今后研究的重点; 偏度随着城市规模的增加呈现出非线性递减的变化趋势, 这与向外扩张可能会受到运输成本、通勤距离急剧增大等成本因素制约有关, 尤其对于规模较小的城市, 偏度与城市规模之间的关系仍需深入研究。

需要指出的是, 尽管对数正态分布能够表征中国城市扩张强度随距离而变化的空间分布规律, 为研究城市扩张提供了必要的方法。但是, 城市扩张受多种因素的共同作用, 目前的方法还存在值得改进之处, 其应用的潜力也值得进一步挖掘, 如: 对于拟合效果较差的城市, 可以结合具体的城市特点, 考虑如何消除一些造成扩张强度计算误差的潜在影响因素(如地形); 此外, 当前的模型建立在同心环分割基础上, 可以进一步分析城市扩张在不同方向上的异质性; 在深入解析城市扩张特征参数与城市原有规模关系的基础上, 可以根据不同规模城市的特点, 通过城市原有规模反演未来城市扩张的可能强度和影响范围。这些问题需要在今后的研究中重点突破, 使

得城市扩张测度方法具有更好的实用性。

参考文献

- 邓爱珍, 丁盈. 2013. 概率论与数理统计. 北京: 科学出版社. 74
- 国家统计局. 2014. 中国统计年鉴2014. 北京: 中国统计出版社
- 姜世国, 周一星. 2006. 北京城市形态的分形集聚特征及其实践意义. 地理研究, 25: 204-212
- 黎夏, 叶嘉安. 1997. 利用遥感监测和分析珠江三角洲的城市扩张过程——以东莞市为例. 地理研究, 16: 16-56
- 李晓文, 方精云, 朴世龙. 2003. 上海城市用地扩展强度、模式及其空间分异特征. 自然资源学报, 18: 412-422
- 刘盛和, 吴传钧, 沈洪泉. 2000. 基于GIS的北京城市土地利用扩展模式. 地理学报, 55: 407-416
- 钱政, 贾果欣. 2013. 误差理论与数据处理. 北京: 科学出版社. 155
- 谈明洪, 李秀彬, 吕昌河. 2004. 20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 1157-1165
- 王雷, 李丛丛, 应清, 程晓, 王晓映, 李雪艳, 胡变运, 梁璐, 俞乐, 黄华兵, 宫鹏. 2012. 中国1990~2010年城市扩张卫星遥感制图. 科学通报, 57: 1388-1403
- 王新生, 刘纪远, 庄大方, 王黎明. 2005. 中国特大城市空间形态变化的时空特征. 地理学报, 60: 392-400
- 郭建国. 2007. 景观生态学格局、过程、尺度与等级. 第2版. 北京: 高等教育出版社. 107
- 俞乐, 王杰, 李雪草, 李丛丛, 赵圆圆, 宫鹏. 2014. 基于多源数据集成的多分辨率全球地表覆盖制图. 中国科学: 地球科学, 44: 1646-1660
- 卓莉, 史培军, 陈晋, 一之瀬俊明. 2003. 20世纪90年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数CNLI方法的探讨. 地理学报, 58: 893-902
- Batty M, Longley P, Fotheringham S. 1989. Urban-growth and form: Scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation. Environ Plan A, 21: 1447-1472
- Chen J, Chen J, Liao A, Cao X, Chen L, Chen X, He C, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W, Tong X, Mills J. 2015. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. ISPRS-J Photogramm Remote Sens, 103: 7-27
- Chen S S, Yan Y, Gao Q, Liu D. 2015. Quantifying circular urban expansion patterns of compact Chinese cities: The case of Yangtze River Delta, China. Environ Plan B-Plan Des, 42: 279-299
- Deng X, Huang J, Rozelle S, Uchida E. 2008. Growth, population and industrialization, and urban land expansion of China. J Urban Econ, 63: 96-115
- Eeckhout J. 2004. Gibrat's law for (all) cities. Amer Econ Rev, 94: 1429-1451

- Guerois M, Pumain D. 2008. Built-up encroachment and the urban field: A comparison of forty European cities. *Environ Plan A*, 40: 2186–2203
- Jat M K, Garg P K, Khare D. 2008. Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *Int J Appl Earth Obs*, 10: 26–43
- Ji W, Ma J, Twibell R W, Underhill K. 2006. Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics. *Comput Environ Urban Syst*, 30: 861–879
- Jiao L. 2015. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion. *Landscape Urban Plan*, 139: 26–39
- Lee S, Li Q. 2013. Uneven landscape and city size distributions. *J Urban Econ*, 78: 19–29
- Luckstead J, Devadoss S. 2014. A comparison of city size distributions for China and India from 1950 to 2010. *Econ Lett*, 124: 290–295
- Schneider A, Woodcock C E. 2008. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. *Urban Stud*, 45: 659–692
- Seto K C, Fragkias M. 2005. Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landsc Ecol*, 20: 871–888
- Sudhira H S, Ramachandra T V, Jagadish K S. 2004. Urban sprawl: Metrics, dynamics and modelling using GIS. *Int J Appl Earth Obs*, 5: 29–39
- Tian G, Jiang J, Yang Z, Zhang Y. 2011. The urban growth, size distribution and spatio-temporal dynamic pattern of the Yangtze River delta megalopolitan region, China. *Ecol Model*, 222: 865–878
- Wu H, Sun Y, Shi W, Chen X, Fu D. 2013. Examining the satellite-detected urban land use spatial patterns using multidimensional fractal dimension indices. *Remote Sens*, 5: 5152–5172
- Xiao J Y, Shen Y J, Ge J F, Tateishi R, Tang C Y, Liang Y Q, Huang Z Y. 2006. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. *Landscape Urban Plan*, 75: 69–80
- Xu X, Min X. 2013. Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in China using remote sensing data. *Cities*, 35: 104–113
- Yu X J, Ng C N. 2007. Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban-rural transects: A case study of Guangzhou, China. *Landscape Urban Plan*, 79: 96–109