论文

城市扩张度量中的重力-空间熵模型

李继红^{①*}, QIU RongXu^②, 熊乐^③, 徐佳栋^①

① 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040;

② University of Lethbridge, Alberta T1K4Z8, Canada;

③ 复旦大学旅游学系, 上海 200433

* E-mail: jhlee@nefu.edu.cn

收稿日期: 2015-04-01; 接受日期: 2015-06-24; 网络版发表日期: 2016-01-26

中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: 2572014CB20)和黑龙江省留学归国人员科研基金项目(编号: LC2013C13)资助

摘要 熵模型和理论为城市土地利用及人口空间分布定量描述提供了新的思路, 被广泛应用于城市发展定量研究中. 然而, 最初的空间熵模型并未能体现出城市地理空间异质性, 并且大多数相关模型并未将空间离散化, 也即距离, 这一基本地理要素考虑在内. 基于此, 本研究建立了一个综合重力和空间离散分布理论的熵模型, 以体现距离及空间分布结构对于城市人口和土地利用熵值的影响. 模型以相对人口密度空间分布为起点, 定义其对总体熵的贡献随距城市中心距离增加而增加, 从而使模型能够体现跳跃式土地利用对熵值的影响. 此外, 人口密度的引入也避免了原模型熵值为负的可能, 从而使模型能够区分同样规模土地利用下不同利用模式对熵值的影响. 模型分析验证表明改进的重力-空间熵模型较原模型更为合理. 研究采用上海市城市建设用地及人口统计历史数据对模型进行验证. 结果显示, 上海市的土地利用和人口空间分布熵值在过去的 30 年稳步增长, 这与上海市的人口和城市用地变化统计数据变化一致. 此外, 分区熵值贡献地图显示模型熵值计算结果与各区县城市发展政策及进程一致.

关键词 熵, 空间熵, 重力模型, 城市扩张

1 引言

城市扩张是20世纪中叶以来世界各国经历的过度城市化过程, 它主要表现为新增建设用地与市中心之间, 各新增建设用地彼此间存在较远距离(Ottensmann, 1977). 一般意义上, 城市居民日益增长的经济社会需求会导致城市建设用地增长, 但不合理的城市用地规划和开发则会导致城市用地的过度

增长, 也即一般称谓的城市用地扩张(Brueckner等, 2001). 城市建设用地的快速扩张会导致优质农业用地的大量流失, 城市交通日渐拥挤, 进而会降低城市居民的生活质量(Ewing等, 2002; Carlesi等, 2013; James等, 2013; Brueckner, 2000; 苗世光等, 2012; 吴志军等, 2011). 因而, 在规划和管理过程中, 城市的规划和管理人员就必须很好地把握城市土地利用空间扩张速度和规模, 进而引导城市土地利用开发和建设

中文引用格式: 李继红, Qiu R X, 熊乐, 徐佳栋. 2016. 城市扩张度量中的重力-空间熵模型. 中国科学: 地球科学, 46: 229-236, doi: 10.1360/07SCES-2014-0141
英文引用格式: Li J H, Qiu R X, Xiong L, Xu J D. 2016. A gravity-spatial entropy model for the measurement of urban sprawl. Sci China Earth Sci, 59: 207-213, doi: 10.1007/s11430-015-5192-5

(Brunner, 2013; Solecki等, 2013; 谈明洪等, 2004).

迄今, 许多学者发明了多种方法用于度量城市扩张. 例如, Besussi等(2003)采用定性研究方法, 从欧洲城市规划和决策人员的角度分析了伦敦城市扩张; Sutton(2003)运用夜间卫星成像和规模调整法测算了美国城市扩张; Hasse等(2003)通过制定一系列土地资源开发影响指标研究了美国新泽西城市扩张状况; Frenkel等(2008)从地形地貌角度研究以色列城市扩张问题; Yue等(2013)等研究人员则从城市地理空间分析角度探究了杭州城市扩张驱动力和特征; Jiang等(2007)以及相关学者也采用地理空间分析方法测算了北京的城市扩张状况. 这些研究都从某一特定的角度和立场对城市扩张进行了研究分析, 但学术界尚未形成统一的研究分析理论和度量方法来对城市扩张进程进行估量测算. 因此, 也就无法对不同城市间的扩张进行横向比较分析.

熵是物理学中度量能量守恒的方法, 被广泛地应用于分子和热力学研究中. Rudolf Classius首先提出可以将熵作为测量特定的时间和空间中地理现象方法(Pooler, 1983). 事实上, 城市人口和土地利用空间熵值能体现出城市的发展是分散还是紧凑, 而且熵值的大小能够反映城市扩张的规模和尺度(Yeh和Li, 2001; Singh, 2014). 通常, 熵值越大, 城市土地利用和人口分布也就越分散. 传统熵模型默认为城市空间是统一的, 城市的土地利用成集中分布态势(Wilson, 2010). 而改进的空间熵模型虽然能够在一定程度上体现出城市空间结构的不对等性(Batty, 1974), 却并没有将空间距离和离散化特性考虑在内.

因此, 本研究通过整合人口密度和重力模型, 对传统的空间熵值模型进行改进, 进而建立城市重力-空间熵模型. 利用该模型, 本研究采用时间序列数据对上海市的土地利用扩张进行了度量, 并对模型的有效性进行了分析验证.

2 城市扩张重力-空间熵模型

熵理论研究总体上可以分为两支, 其中一支为传统的物理学领域熵, 另一支为信息学研究中的熵. 1856年, Rudolf Classius将熵定义为热能变化与温度的比值(Pooler, 1983).

$$\Delta S = \Delta Q/T, \quad (1)$$

式中 S 为熵, Q 为能量总量, T 表示温度. 这表明在固定温度下, 系统的熵值会随着能量的变化而变化.

在探究信息传递中不同对象信息交流互动过程中, Shannon等(1949)研究人员将熵定义为从随机分布事件中所获得的信息.

$$H_n = -\sum_i^n p_i \log(1/p_i), \text{ while } \left(\sum_i^n p_i = 1\right). \quad (2)$$

这一定义将空间区域划分为 n 个空间位置, H 为熵值, p_i 为 i 位置上的事件的概率.

在物理学领域中, 根据热力守恒原理, 分子之间的交互越剧烈, 系统的熵值就越高(Yeh和Li, 2001), 而且熵值也只有在温度变化时才会存在(Mogridge, 1972; 吴晶和过增元, 2010). 在信息科学领域, 熵值的变化表明系统中各分子和事件分布越分散, 能够从系统中获得的信息就越多(Batty, 2010; Bao等, 2010). 因此, 应用研究的目标便可以转化为将这一过程最大化, 以寻求最佳的问题解决方案(Aguilera和Ugalde, 2014; Ruan和Wu, 2015; Sun等, 2010). 尽管物理学和信息科学领域中熵的概念和模型似乎存在着很大差异, 但二者都体现出系统组成分子和事件之间的相互作用. 相应地, 熵值所体现的是在特定的时间和空间中, 组成分子和事件分布规律性和统一性(Pooler, 1983). 基于此, Shannon的熵理论可以充分地估量出地理空间中, 特别是在城市扩张过程中, 土地利用和人口分布空间的离散和聚合现象(Theil和Finizza, 1971; Thomas, 1981).

城市扩张指的是一种无规划、不可控、不协调的发展, 这种发展往往表现为错综复杂、密度低、条带状、分散、孤立型的土地利用和人口分布模式(Carruthers和Gudmundur, 2002). 常见的城市扩张有三大主要特征: 跨越型或分散型区域发展、低密度土地利用迅速增长、以及单一功能区域用地面积大幅度增加. 相对应的区域通常占有利用率较低, 而且缺少功能性的开放空间(Ewing, 1997). 因而, 简单的将Shannon熵模型应用在地理空间研究中, 特别是城市扩张研究中, 就会面临两个主要问题. 首先, Shannon熵模型默认城市空间是统一的, 即所有的组成子区域大小规模一致(图1, 一致型城市); 其次, Shannon熵模型默认各组成子区域之间彼此紧密相连(图1, 紧凑型城市). 事实上, 组成一个城市的子区域规模和形态迥异, 当前大多数城市的土地利用存在子区域

图1 不同的距离和密度对空间熵值的影响

间相互分离(图1, 分散型城市), 而且形态相去甚远的特征(图1, 多样型城市). 显然, 离散的城市土地利用模式下的熵值要高于密集型城市. 而且各种规模的土地利用, 以及相关地理实体的空间分布, 都会对熵值的计算产生重要的影响. 如果不将这些因素考虑在内而简单的采用Shannon熵模型是无法准确地测算出城市扩张程度的.

在Shannon熵理论和模型的基础上, Batty通过引入人口密度, 将空间离散隔距纳入到模型中. 这就是著名的空间熵模型:

$$H_n = -\sum_i p_i \log \left[\frac{p_i}{\Delta x_i} \right], \sum_i \Delta x_i = \text{total urban area } x. \quad (3)$$

尽管如此, 当采用这一模型计算城市空间熵时, 又引发出两个问题. 首先, H 在这里可能为负数. 假设 $p=0.5$ 且 $\Delta x=0.4$, 那么 $\log \left[\frac{p_i}{\Delta x_i} \right] > 1$, 这也就使得 H 小于0. 这与熵是一个不可逆过程这一基本理论原则相背离(Tolman和Fine, 1948). 其次, 该模型并没有完全将距离影响考虑在内. 例如, 当一个城市存在多个中心, 城市人口和土地利用集中分布于相互独立的中心时, 也是一种集中发展模式, 这种模式下的城市土

地利用和人口分布熵值应该很小, 而这些在该模型中很难得到体现. 为解决这种矛盾, Yeh等(2001)将城市土地利用密度引入模型中:

$$H_n = \sum_i^n \text{PDEN}_i \log(1/\text{PDEN}_i), \quad (4)$$

式中, DEN_i 为土地开发利用密度, $\text{PDEN}_i = \text{DEN}_i / \sum_i \text{DEN}_i$ 则是土地开发利用密度的概率分布. 虽然该模型解决了熵值存在负数的问题, 但仍没有将距离因素考虑在内. 而且, 很难从实际中给土地开发利用密度一个有意义的解释.

重力模型起源于牛顿万有引力定律(Rooij, 2008), 指的是物体之间的引力会随着质量的增加和距离的缩短而增加(Wang和Guldman, 1996). 在对城市人口密度的理论和经验研究过程中, 众多学者发现城市的人口和经济活动空间分布呈现由市中心向外围区域逐渐降低, 呈负指数函数相关的模式(Mills, 1970). 这便是城市地理学中著名的重力模型:

$$D_i = D \times \exp(-\lambda r_i), \quad (5)$$

模型中的 D 为市中心人口密度, r_i 为子区域地理位置距市中心的距离, D_i 为子区域 i 的人口密度, λ 为衰减系数.

在重力作用随距离递减理论的基础上, 能够很容易地看到, 随着距市中心距离的增加, 子区域的熵值会呈指数增长趋势. 借鉴重力递减模型, 本研究将其引入至空间熵模型中, 并将 μ 其定义为熵增长系数:

$$p_i = q_i \exp(\mu r_i). \quad (6)$$

此外, 人口密度也是一种有效测量估量人口集聚程度重要指标, 因此本研究将 q_i 定义为相对人口密度.

$$q_i = x_i / s_i, \quad (7)$$

其中, x_i 为子区域 i 人口在总人口中的比例, s_i 则为该子区域相应的建设用地比例:

$$x_i = \frac{x_i}{x}, \quad s_i = \frac{s_i}{s}, \quad (8)$$

式中, x_i 为子区域 i 人口, x 为该区域总人口, s_i 为子区域建设用地面积, s 为该区域总建设用地面积.

在城市土地利用和人口空间分布过程中, 高密度意味着高人口聚集度, 熵值就应该越小, 因此相对人口密度应该与熵值成反相关关系. 因此, 本研究定义:

$$p_i = (q_i)^{-1} \exp(\mu r_i). \quad (9)$$

至此, 重力-空间熵便可定义为

$$H_n = \sum_i^n (q_i)^{-1} \exp(\mu r_i) \log \left(1 / \left((q_i)^{-1} \exp(\mu r_i) \right) \right). \quad (10)$$

与传统熵理论和模型相对应, 本模型仍然要求 $\sum_i^n p_i = 1$. 从模型中可以看出, 当城市所有人口都密集在市中心时, 即 $r=0$, $x=1$, $s=1$, 这时 p 值等于1, 而熵值为0. 这是理想的城市土地利用和人口空间分布模式. 本文下一部分通过虚拟城市土地利用和人口空间分布模式来验证该模型的有效性.

3 模型验证

为了验证重力-空间熵模型的有效性, 即与其他既有熵模型相比其更适用于城市扩张的度量中, 本研究建立了两个虚拟的城市土地利用和人口空间分布模型(图2). 两个虚拟城市都由三种不同的人口密度社区组成. 假设R是拥有8个单位人口的市中心; R1代表邻近社区, 有4个单位人口; R2则代表郊区社区, 各有2个单位人口; 城市A和城市B的R3同样是邻近郊区社区, 有4个单位人口, 并且有着同样面积的未利用区域. 其他13个社区都有着方形的边界, 土地利用值为1. 城市A与城市B之间的区别在于城市A的R3社区的土地利用和人口集中在这两个社区的远端, 而城市B的R3社区的土地利用和人口则散布在社区邻近边缘. 在现实中, 这两种类型都是非常常见的人口分布和土地利用模式. 城市A代表的是被独立的社区和城镇环绕的城市, 在其城市边界线范围内有一些未开发利用的土地或者绿地, 这也是城市扩张的一个典型表现. 城市B则在土地使用方面更具有连续性, 可作为熵值参考点. 理论上而言, 城市A与城市

图2 用于验证重力-空间熵模型的虚拟城市

B相比要更为分散一些, 因而其熵值也要高于城市B.

在建立两座虚拟城市模型的基础上, 本研究根据Shannon, Batty, Yeh以及新建立的重力-空间熵模型分别计算了两座城市在不同模型下的熵值(表1). 在Shannon模型之中, 由于 p 为概率人口分布, 这一数值在两种城市模型中保持稳定, 不受社区密度以及居住用地空间结构的影响. 因此城市A和城市B的熵值均为2.639. Batty的改良熵模型虽然是基于精确的数字计算, 但其并没有将居住用地之间的距离考虑在内, 由于模型计算以社区行政边界为基础, 因而这一计算结果无法反映出社区内部土地使用结构. 尽管两个城市在土地利用方面存在差异, 但其熵值却保持一致. Yeh的模型采用城市土地开发概率密度, 对两个虚拟城市而言无论内部结构如何, 土地开发密度始终等于0.5, 因而该模型在两种条件下的熵值依然保持不变. 而对于新建立的引力空间熵模型而言, 两个城市的R3社区, 与R1社区有着同样的人口, 它们的居住用地面积虽然占各自社区总面积的1/2, 但绝对值仍与R1相同, 因而其人口密度也是一样的. 但与既有模型相比, 新模型通过将重力因素整合至人口密度之中, 从而区分了社区远近对熵值的影响. 计算结果表明城市B的熵值与城市A相比较小, 说明其有着更为紧凑的土地利用及人口空间分布模式.

这些实验表明, 新建立的重力-空间熵模型较之其他既有的模型在估量测算城市扩张方面要更为适宜. 在下一部分中, 本文将利用重力-空间模型来分析上海市的土地利用及人口空间分布演变.

表1 城市A与城市B的熵值比较

模型	熵值(城市A)	熵值(城市B)
$H_n = \sum_i^n p_i \log(1/p_i)$	2.639	2.639
$H_n = -\sum_i^n p_i \log \left[\frac{p_i}{\Delta x_i} \right]$	2.550	2.550
$H_n = \sum_i^n PDEN_i \log(1/PDEN_i)$	2.689	2.689
$H_n = \sum_i^n (q_i)^{-1} \exp(\mu r_i) \log \left(\frac{1}{((q_i)^{-1} \exp(\mu r_i))} \right)$	2.033	2.011

4 重力-空间熵模型应用

上海市位于长江入海口, 是中国四座直辖市之一, 市辖面积为 6396 km², 是中国人口最多的城市 (2010 年人口普查结果). 20 世纪 90 年代以来, 不断深化和提升的经济政策、制度改革, 引领了上海市持续扩展的城市用地面积增长和人口空间分布演变. 至 2010 年, 上海市城市化面积是 1987 年的 2 倍, 其人口规模也是 1980 年的 2 倍多. 上海城市发展历程相对于国内外其他大都市有何特征? 上海市是否经历着类似于西方国家的城市扩张? 本研究运用已建立的重力-空间熵模型, 对上海市人口空间分布和城市建设用地熵值演变进行度量计算. 计算过程中所用的数据包括 1980, 1999, 2002, 2006, 2010 以及 2013 年的城市人口数据, 以及通过陆地卫星遥感影像获取的对应年份的土地利用状态数据.

采用新建立的重力-空间熵模型进行城市土地利用扩张及人口空间分布度量的第一步是模型中 μ 值的获取. 鉴于模型中独立年份的熵值计算需要满足特定的约束条件, 因此不同年份的熵值对应不同的 μ 值. 本研究采用 Matlab 软件求解对应年份熵值模型中的 μ 值. 模型的计算结果如表 2.

人口统计数据和从遥感影像获取的土地利用数据显示, 在过去的 30 年间上海市的总人口持续高速增长, 其中在 1980~2013 年间城市人口翻了一番; 整个城市的城市建设用地显著膨胀, 2013 年的城市建设用地规模是 1980 年的 10 倍以上. 熵值计算结果显示, 历史年份的熵值呈不断攀升趋势 (表 2 和图 3), 其中 1980 年的熵值为 0.887, 是唯一低于 1 的年份. 在 1999 年, 这一数值首次超过了 1. 不同年份间熵值变化如下: 1980~1999 年为 0.009, 1999~2002 年为 0.011,

图 3 重力-空间熵值

2002~2006 年为 0.003, 2006~2010 年为 0.0005, 2010~2013 年为 0.007. 计算结果整体趋势表明上海市城市土地利用及人口空间分布在 1980~2013 年间呈稳步扩张态势, 但各年份间的扩张规模呈现一定程度的波动. 此外, μ 值在 1980~2013 年间呈下降趋势, 从 1980 年的 0.374, 降至 2013 年的 0.152.

为了验证分析熵值计算结果, 本研究统计了 1983~2013 年上海市城市土地利用和人口规模变化 (图 4). 数据统计结果显示, 在过去的 30 年上海市无论在城市建设用地还是人口规模方面都经历了迅猛增长过程, 其中早期上海市的城市用地增长速度要慢于人口增长速度, 二者在 2002 年产生交叉. 换言之, 在 2002 年之前, 城市用地扩张小于人口增长, 但在此之后前者就超过了后者. 政策分析表明, 在经济体制改革 (1980 年左右) 之前, 中国大部分城市的土地利用和住房建设都处于计划政策调控下, 大多数城市都经历了紧凑型增长模式, 城市建设用地发展要滞后于人口增长. 随着经济体制改革的不断展开和

表 2 上海土地利用及人口空间分布重力-空间熵

年份	人口(万人)	建设用地(km ²)	μ	熵
1980	1146.29	236.59	0.374	0.887
1999	1313.12	1192.54	0.219	1.061
2002	1334.23	1608.42	0.189	1.095
2006	1815.08	2521.82	0.168	1.110
2010	2302.68	3502.34	0.160	1.112
2013	2426.11	3982.59	0.152	1.132

图 4 上海市的人口及城市用地

深化,越来越多的农业用地转变为工业用地和居住用地。此外,随着经济发展和居民生活水平的提高,城市大型商业、娱乐等基础设施需求也不断增长。这

些都带动了城市建设用地规模的不断攀升,并且城市用地的扩张趋势与土地价格的上涨趋势并驾齐驱。

为了更好地理解分析上海市人口以及土地利用

图5 上海市重力-空间熵分布

扩张演化过程, 本研究绘制了1980, 2002, 2006和2013年城市土地利用及人口空间分布分区熵值地图(图5). 1980年熵值地图显示, 熵值较高区域主要集中在中心城区的核心区域——黄浦、卢湾、普陀、闸北、杨浦、虹口和徐汇等区. 此外, 浦东新区的熵值也相对较高. 2002年的熵值地图显示, 除了浦东新区外, 宝山、闵行和嘉定等近郊区县对整体熵值贡献也相对较高. 2013年熵值地图显示, 南汇、奉贤、松江和崇明等远郊区县的熵值也相对较高. 时间序列的熵值变化趋势与整个上海市城市发展过程基本吻合, 例如1990年浦东新区的建立, 1992年闵行区的设置, 以及嘉定、松江、奉贤和南汇等区县工业园区的设立都带动了城市土地利用扩张及人口规模增长.

5 讨论与结论

城市扩张作为城市化过程中一种显著特征, 给当代城市发展带来了诸多问题. 例如, 优质耕地资源的流失, 道路交通日益拥堵, 居民生活体验满意度日益下降等负面影响. 了解并把握这一过程和趋势能够辅助城市决策者和管理者更好地制定城市发展政策. 作为一种空间和非空间交互分析工具, 熵模型可以有效地度量城市扩张规模和速度. 因此, 本研究通过融合地理空间重力模型, 对传统空间熵模型进行改进. 并且, 模型也将传统的距离衰减理论引入到空间熵理论中, 定义随着人口密度的降低, 空间熵值增加.

采用新建立的重力-空间熵模型, 本文计算了上海市1980~2013年间的熵值变化及空间分布. 计算结果显示, 上海市的土地利用和人口空间分布熵值在过去的30年稳步增长, 这与上海市的人口和城市用地统计数据变化一致. 此外, 分区熵值贡献地图显示模型熵值计算结果与各区县城市发展政策及进程一致.

尽管新建立的重力-空间熵模型对城市土地利用和人口空间分布进行了较好的度量和测算, 仍有一些其他的限制因素值得进一步的探讨.

首先, 熵值的意义. 随着理论的验证和模型的应用, 一些问题便相应而生: 熵值大小到底意味着什么? 熵值为2或者10是不是就意味着城市扩张过快? 熵值为0或接近于0是不是就意味着城市土地利用和

人口空间分布健康发展? 如何对模型在上海的应用结果进行解释, 该模型又是否能适用于其他城市规划和管理? 热力学中将熵定义为能量随温度所发生的变化, 它作为一个相对变量描述事件动态演化过程. 同样的能量变化在不同的温度条件下会有不同的熵值表现. 因此, 采用一个量化固定的数值来判断一个城市是否存在扩张似乎并不绝对可靠, 例如, 很难判定与现有上海快速扩张的高密度郊区居住用相比, 柏林郊区多层公寓的建设就是扩张. 只有从特定的时间和空间角度出发, 利用熵模型来度量城市的扩张演化才有意义. 模型在上海的应用结果表明该区域的熵值在过去的30年间没有发生太大的变化. 对城市用地和人口空间分布的历史数据分析也表明上海的土地利用与人口空间分布经历了相对稳定的增长扩展过程, 而不是所谓的西方式的扩张, 特别是在2000年左右, 整个城市的人口增长开始高于建设用地增长.

其次, 空间尺度对于熵值的影响需要进一步研究. 考虑到历史数据的不可获得性, 本研究将区县作为最小的计算单位对整个区域的熵值进行测算. 模型中, 人口的密度则是区内总人数与区域总建设面积的比值. 如果采用社区层次或更细尺度的数据时, 熵值便可能会发生变化. 同样, 熵模型只是一种相对的度量工具, 只有在测量规模固定的前提下才会有意义. 因而, 更具体的人口和土地利用数据会产生更有意义的结果.

最后, 城市间的熵值对比. 除了以上分析外, 模型的测算也提出了一些其他的问题: 就当前的计算结果而言, 上海与其他中国和世界范围内城市相比是不是存在过度的城市扩张? 哪些抑制措施和政策可以用来控制城市扩张? 这些都需要通过更多的案例研究, 对本文中所构建的熵值模型进行进一步理论和实践探索.

参考文献

- 苗世光, 窦军霞, Chen F, 李炬, 李爱国. 2012. 北京城市地表能量平衡特征观测分析. 中国科学: 地球科学, 42: 1394–1402
- 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
- 吴晶, 过增元. 2010. 熵的宏观物理意义的探索. 中国科学: 技术

- 科学, 40: 1037–1043
- 吴志军, 胡敏, 岳珂利, Wehner B, Wiedensohler A. 2011. 重污染和新粒子生成过程中城市大气颗粒物数谱分布演变过程. 中国科学: 地球科学, 41: 1192–1199
- Aguilera A, Ugalde E. 2014. Graph entropy as tool for understanding complex urban networks. The case of Ensenada city, Mexico. *Int J Soc Syst Sci*, 6: 87–99
- Bao T F, Peng Y, Cong P J, Wang J L. 2010. Analysis of crack propagation in concrete structures with structural information entropy. *Sci China Tech Sci*, 53: 1943–1948
- Batty M. 1974. Spatial entropy. *Geogr Anal*, 6: 1–31
- Batty M. 2010. Space, scale, and scaling in entropy maximizing. *Geogr Anal*, 42: 395–421
- Besussi E, Chin N. 2003. Identifying and measuring urban sprawl. In: Longley P A, Batty M, eds. *Advanced Spatial Analysis: The CASA Book of GIS*. Redlands, CA: ESRI Press. 109–128
- Brueckner J K, Mills E, Kremer M. 2001. Urban Sprawl: Lessons from Urban Economics. In: Burtless G, Pack J R, eds. *Brookings-Wharton Papers on Urban Affairs*. Washington DC: Brookings Institution Press. 65–97
- Brueckner J K. 2000. Urban sprawl: Diagnosis and remedies. *Int Region Sci Rev*, 23: 160–171
- Brunner A. 2013. The effects of urban sprawl on daily life: Smart growth implementation of Atlantic station. In: *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*
- Carlesi S, Gionata B, Moonen A C, Frumento P, Bàrberi P. 2013. Urban sprawl and land abandonment affect the functional response traits of maize weed communities in a heterogeneous landscape. *Agric Ecosyst Environ*, 166: 76–85
- Carruthers J I, Gudmundur F U. 2002. Fragmentation and sprawl: Evidence from interregional analysis. *Growth Change*, 33: 312–340
- Ewing R. 1997. Is Los Angeles-style sprawl desirable? *J Am Plan Assoc*, 63: 107–126
- Ewing R, Rolf P, Chen D. 2002. *Measuring Sprawl and Its Impact: The Character and Consequences of Metropolitan Expansion*. Washington DC: Smart Growth America
- Frenkel A, Maya A. 2008. Measuring urban sprawl: How can we deal with it? *Environ Plan B Plan Design*, 35: 56
- Hasse J E, Richard G L. 2003. Land resource impact indicators of urban sprawl. *Appl Geogr*, 23: 159–175
- James P, Troped P J, Hart J E, Joshi C E, Colditz G A, Brownson R C, Ewing R, Laden F. 2013. Urban sprawl, physical activity, and body mass index: Nurses' health study and nurses' health study II. *Am J Pub Health*, 103: 369–375
- Jiang F, Liu S H, Yuan H, Zhang Q. 2007. Measuring urban sprawl in Beijing with geo-spatial indices. *J Geogr Sci*, 17: 469–478
- Mills E S. 1970. Urban density functions. *Urban Stud*, 7: 5–20
- Mogridge M J. 1972. The use and misuse of entropy in urban and regional modelling of economic and spatial systems. *TRID*
- Ottensmann J R. 1977. Urban sprawl, land values and the density of development. *Land Econ*, 53: 389–400
- Pooler J. 1983. Information theoretic methods of spatial model building: A guide to the unbiased estimation of the form of probability distributions. *Socio-Econ Plan Sci*, 17: 153–164
- Rooij M. 2008. The analysis of change, Newton's law of gravity and association models. *J Roy Stat Soc A Sta*, 171: 137–157
- Ruan B F, Wu H R. 2015. Urban sustainable development capacity evaluation model research and application based on entropy and distance functions. In: *2015 International Symposium on Computers & Informatics*
- Shannon C E, Weaver W, Blahut R E, Hajek B. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press. 117
- Singh B. 2014. Urban growth using Shannon's Entropy: A case study of Rohtak city. *Int J Adv Remote Sens GIS*, 3: 544–552
- Solecki W, Seto K C, Marcotullio P J. 2013. It's time for an urbanization science. *Environ Sci Policy Sust Dev*, 55: 12–17
- Sun X L, Jia L M, Dong H H, Qin Y, Guo M. 2010. Urban expressway traffic state forecasting based on multimode maximum entropy model. *Sci China Tech Sci*, 53: 2808–2816
- Sutton P C. 2003. A scale-adjusted measure of "urban sprawl" using nighttime satellite imagery. *Remote Sens Environ*, 86: 353–369
- Theil H, Finizza A J. 1971. A note on the measurement of racial integration of schools by means of informational concepts. *J Math Sociol*, 1: 187–193
- Thomas R W. 1981. *Information statistics in geography*. Norwich: Geo Abstracts
- Wang F H, Guldman J M. 1996. Simulating urban population density with a gravity-based model. *Socio-Econ Plan Sci*, 30: 245–256
- Wilson A. 2010. Entropy in urban and regional modelling: Retrospect and prospect. *Geogr Anal*, 42: 364–394
- Yeh A G O, Li X. 2001. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. *Photogramm Eng Remote Sens*, 67: 83–90
- Yue W Z, Liu Y, Fan P L. 2013. Measuring urban sprawl and its drivers in large Chinese cities: The case of Hangzhou. *Land Use Policy*, 31: 358–370