

基于耗散结构理论低碳城市发展水平评价研究

——以上海市为例¹

杨 笠

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

【摘要】：基于信息熵理论，结合低碳城市系统的耗散结构特征，建立低碳城市发展的熵变模型以及评价指标体系，通过相应的熵变分析和指数分析，进而对低碳城市系统的有序度和发展水平进行量化研究。研究结果表明，上海低碳城市系统的熵流和总熵逐年变小，城市发展的有序度逐渐增加；综合发展指数缓慢稳步增长，协调发展指数围绕着某一特定值附近波动并略有下降的趋势，说明社会经济单方面的高速发展并不能为低碳城市系统的可持续发展提供相应的保障。在此基础上提出提升上海市低碳发展水平的相关对策与建议。

【关键词】：耗散结构；低碳城市；熵变模型

【中图分类号】：F299.27 **【文献标识码】**：A

1、引言

20 世纪 80 年代以来，世界经济飞速发展、科技创新日新月异，城市化作为国家重要的发展政策，是促进经济增长的内生动力之一。而在城市化进程中，不断面临着日趋严峻的能源供应危机与气候恶化难题，我国经济发展方式迫切需要加快转变，探求一种“低能耗、低污染、高效益”的新型发展模式。2015 年 3 月 5 日，国务院总理李克强在政府工作报告中明确提出二氧化碳的排放强度至少下降 3.1%，以达到环境治理与节能减排的更高要求，这无疑使得“低碳城市”再次成为研究的热点。

上海市作为国家发改委第二批确定的低碳试点城市之一，在探求解决气候恶化问题实现城市可持续发展过程中，就如何控制碳的排放等方面已达成了一致意见，但针对怎样更加客观公正地监测与评价低碳城市的发展状况，还没有一个完全统一的标准和较为成熟的实践方案。城市作为一个复杂的动态运行系统，这些无疑是实现低碳城市的发展亟待解决的问题。基于此，本文拟从低碳城市的耗散结构出发，深刻描绘低碳城市的演化路径，动态监测上海市低碳发展状态，定量分析并综合评价上海市低碳化发展水平。

2、低碳城市耗散结构的理论分析

基于耗散结构原理，可将城市视为一个较为庞大的开放性系统，进而对其在低碳条件约束下城市发展的演变路径进行深入剖析，亦可将低碳城市这一复杂系统细分为资源、环境、社会、经济等四个子系统。这些子系统之间相互依存、相互影响、相互制约，促使整个城市系统历经碳的“排放——吸收——排放”的较稳定的生态循环。在城市逐步发展和碳排放量不断扩大的过程中，如果城市系统中的某一子系统受到过度破坏性人为干涉的影响，那么城市系统的碳循环就会被严重地打破，各个子

¹【收稿日期】：2018-03-12

【作者简介】：杨 笠（1991-），男，江苏泰兴人，硕士研究生，研究方向：管理统计。

系统也会随之出现显著性的变化，极有可能导致诸如“温室效应”、“热岛效应”等问题的出现。而在低碳条件的约束下，城市系统内外诸多要素之间具备着非线性作用机制，促进城市系统演变至有序的安全状态，形成具有稳定性的耗散结构，推动着整个城市系统向稳定有序的低碳方向发展。故低碳城市系统具有典型的耗散结构性质，而且是一种有人类参与并作为中心主体的高级形式的系统。

3、低碳城市耗散结构熵变评价模型的构建

3.1 低碳城市系统的信息熵

信息的容量大小是一个难以量化的指标。20 世纪中叶，信息论的创始者香农提出了“信息熵”的概念，用以描述信息源的不确定度。系统的信息熵越高那么就表明系统的无序度越高。

低碳城市系统具有典型的耗散结构特征，其演化过程可以利用系统的熵变模型来加以诠释，进而可以采取“信息熵”的方法来综合讨论分析低碳城市系统演化的过程及方向。低碳城市系统的熵变是由熵流和内部熵增加两个部分共同决定。故可建立关于低碳城市系统的熵变模型：

$$dS = diS + deS \tag{1}$$

模型（1）中，diS 表示低碳城市系统内部熵产生，即低碳城市系统内部环境质量下降及生态环境建设产生的熵变，其值只能为正。diS 可以进一步用损耗型代谢熵和再生型代谢熵表征。损耗型代谢熵表示系统内部有效资源的使用和浪费，是对环境产生的负面影响；再生型代谢熵表示系统内部通过自身原有物质资源创造出来的可供自身使用的有效资源，是环境保护和污染治理能力的体现。deS 表示低碳城市系统与经济、环境等其他系统进行能量的相互传递而产生的熵流，熵流的值可正可负当然也可以为零，当 deS<0 时称之为负熵流。deS 也可以用他系统支持型输入熵和他系统压力输出熵来表征。他系统支持型输入熵表示其他诸如社会经济系统、自然资源系统等对低碳城市系统的在资金和资源方面的支持作用；他系统压力输出熵表示低碳城市系统对其他经济社会系统或自然资源系统所产生的压力输出。dS 表征系统的总熵变，即低碳城市系统内部熵产生与外部系统之间的熵流之和。

根据耗散结构理论可知，要使得城市系统在低碳条件的约束下能够处于稳定有序的发展状态，那么系统就必须地获得足够的负熵流，并使其在抵消系统内部熵产生的同时，还能够存有富余的负熵流。而作为复杂程度较高的低碳城市系统，该如何源源不断地获取有效的负熵流呢？这种有效的负熵流的获取可分为两大部分：一部分来源于城市系统的还原性代谢功能，即由系统内外自适应协调功能进行物质、能量和信息等的交换而产生；另一部分则是人类对城市系统进行偏向性地干预（如节能减排制度、扶持环保型企业政策等）以获得负熵流。这两部分之和是形成有效负熵流的基础。

表 1 低碳城市系统熵变指标体系

目标层	准则层	指标层	单位	权重
低碳城市熵变指标	他系统	人均 GDP	元/人	0.091
	支持型	城镇居民家庭人均可支配收入	元	0.111
	输入指标	第三产业占 GDP 的比重	%	0.07
		森林覆盖率	%	0.118
	他系统	每万人拥有公共汽车数	台/万人	0.067
	压力型	环境污染治理投资占 GDP 比重	%	0.086
	输出指标	生活垃圾无害化处理率	%	0.092

标	标	城市污水处理率	%	0.072
体	损耗型	单位地区生产总值能耗	t 煤/万元	0.013
系	代谢指	人均碳排放	t/人	0.011
	标	人均能源消费量	t/人	0.06
	再生型	三废综合利用价值	万元	0.077
	代谢指	工业固体废物综合利用量	万 t	0.071
	标	碳生产力	元/t	0.062

由于低碳城市系统是一个经济、资源、社会、环境复合的系统，需要用多个指标来描述系统的状态和变化。故基于低碳城市系统总体的特征，结合耗散结构理论和系统熵产生的原理，借鉴辛玲、刘钦普等学者的研究成果，按照科学性、综合性、系统性以及可操作性等原则，从他系统支持、他系统压力、损耗和再生这四个维度作为一级指标建立低碳城市系统熵变指标体系（见表1）。他系统支持指标和他系统压力指标和他系统压力指标包含经济、资源、环境等方面的影响因素，表明了低碳城市系统与其他系统之间的熵流；损耗指标和再生指标包含了系统内部资源的消耗和再生对环境产生的影响等因素，表明了系统的熵产生。

3.3 低碳城市耗散结构熵变评价模型的构建

3.3.1 指标的无量纲化。由于指标体系中各指标有正、逆指标之分，而且各指标之间的数值大小和量纲也存在差异，不便于进行比较，故将这些指标值进行归一化处理。现采用阈值法将各指标值进行无量纲化处理，用公式表达为：

$$r_{ij} = \begin{cases} x_{ij} / \max(x_{ij}) & \text{当指标为正指标时;} \\ \min(x_{ij}) / x_{ij} & \text{当指标为负指标时} \end{cases} \quad (2)$$

式（2）中， r_{ij} 代表指标 i 的在 j 年的归一值， x_{ij} 代表的是指标 i 在 j 年的原始值， $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 分别代表 j 年中指标 i 的最大和最小指标值。

3.3.2 低碳城市系统年份序列的信息熵值的计算。基于信息熵原有的计算公式，通过公式的替换，低碳城市耗散结构的四个类型因子的年份 j 的信息熵表达为：

$$H_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

式（3）中： $p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}$, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

3.3.3 低碳城市系统指标权重的确定和分值的计算。计算各指标信息熵 E_i 的得分值，是测算低碳城市系统协调发展和综合发展指数的前提。其具体的计算公式如下：

①计算第/项指标的信息熵：

$$E_i = -(\ln m)^{-1} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \text{ 其中; } p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

②计算第项指标的权数： $\alpha_k = \frac{1 - E_k}{n - \sum_{i=1}^n E_i}$ ，其中， $\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1, 0 \leq \alpha_k \leq 1$ ；

③计算出各个指标的得分值： $f_k(x) = \sum \alpha_k r_{ij}$ 。

上式中 $f_k(x)$ 分别为他系统支持指标、他系统压力指标、损耗指标、再生指标这四个一级指标的得分值， ω_i 为各个指标所占的权重， r_{ij} 为原始数据归一化处理后的值。

3.3.4 低碳城市系统模型指数的计算。用 T 来表示模型的综合发展指数，表明他系统支持、他系统压力等各类型的要素在低碳城市系统运行时起到的作用大小，体现出低碳城市系统的综合发展水平，其计算模型如下：

$$T = \sum_{k=1}^4 \alpha_k \cdot f_k(x) \quad (4)$$

模型（4）中， α_k 为比重系数，且 $\sum_{k=1}^4 \alpha_k = 1$ ，表征各个一级类别指标的重要性。

用 D 来表示协调发展指数，它表征着他系统支持、他系统压力、损耗、再生等因素之间协调发展的状况的好坏。其数值越大意味着协调度越好，反之则越差。其表达式为：

$$D = \sqrt[\lambda]{\frac{\prod_{k=1}^4 f_k(x)}{\left[\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 f_k(x)\right]^4}} \times T \quad (5)$$

模型（5）中， $\lambda \geq 2$ 为常数，在此取值为 2。

4、实证研究

4.1 熵值分析

根据上海市 2007~2015 年的统计资料和构建的评价模型，计算出上海低碳城市系统的各类熵值及指数值（见表 2）。表 2 中，熵流是他系统支持输入熵与他系统压力输出熵的矢量和，熵产生为损耗型代谢熵和再生型代谢熵的矢量和。由表 2 数据拟合生成的趋势曲线图（见图 1）更直观地反映出，自 2007 年至 2015 年期间，上海市低碳城市系统总熵变均为负值，熵流和总熵在动态趋势走向上保持相对一致性，并且整体上表现出逐年下降的趋势，说明上海市总体上向着低碳、健康、有序的方向发展。而在这期间熵产生大致表现出平稳并伴有小幅波动的趋势，说明上海低碳城市系统内部的无序度增加的速率不断减弱，整个低碳城市系统逐步趋向于稳定。这些主要得益于上海市经济高质量的发展和人均收入水平的稳步提升。但与此同时也不能对 2013 年因低碳城市系统熵流的突变而引起总熵值的突变的状况加以忽视 其主要原因在于随着低碳试点城市政策的不断深化和推进，国家对城市系统的低碳化要求逐渐提升，城市绿化、公共交通以及废水废弃物处理等方面问题亟待解决。综上所述，低碳城市系统的熵流在低碳城市建设中起到至关重要的作用，它是系统有序发展的保证，加大财政投入与支持、提高经济发展的生态效率、削减低碳城市压力源、调控压力传递将会是日后的重中之重。

表 2 上海低碳城市系统的熵值及指数值

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
他系统支持熵	0.382	0.379	0.372	0.373	0.420	0.414	0.437	0.439	0.445
他系统压力熵	0.247	0.261	0.268	0.268	0.263	0.249	0.232	0.248	0.247
损耗熵	0.316	0.320	0.318	0.316	0.311	0.315	0.312	0.310	0.309
再生熵	0.265	0.262	0.277	0.283	0.264	0.277	0.275	0.262	0.259
熵流	-0.136	-0.118	-0.104	-0.104	-0.157	-0.165	-0.206	-0.192	-0.199
熵产生	0.051	0.058	0.041	0.033	0.047	0.038	0.038	0.049	0.050
总熵	-0.085	-0.059	-0.062	-0.071	-0.110	-0.127	-0.168	-0.143	-0.148
综合发展度	0.180	0.190	0.209	0.221	0.227	0.221	0.224	0.235	0.238
协调发展度	0.279	0.286	0.302	0.301	0.286	0.294	0.272	0.268	0.266

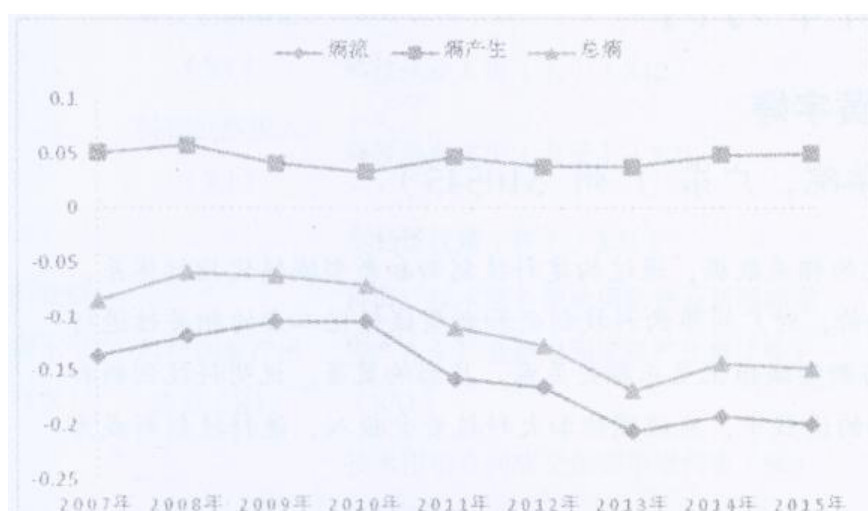


图 1 上海市低碳城市熵变分析图

4.2 指数分析

由表 2 中综合发展指数和协调发展指数序列拟合生成的曲线图（见图 2）可知，从 2007~2015 年，上海市低碳城市系统的综合发展度指数由 2007 年的 0.18 增长到 2015 年的 0.238，呈现出小幅度稳步增长的趋势，说明随着低碳城市建设的加强，上海市的社会经济和环境得到了更好的发展。另一方面，上海市低碳城市系统的协调发展指数大体上围绕着 0.28 上下波动，但是在 2011 年之后，由于上海市经济持续过热的增长给自然资源与环境造成沉重压力，导致协调度略有降低，从侧面反映出今自 2011 年以后生态环境建设将成为上海市低碳城市建设的重点和关键。换言之，社会经济单方面的高速发展并不能为低碳城市系统的可持续发展提供相应的保障，只有加强低碳环境建设的投入力度，与环境系统协调发展才是实现上海低碳城市建设的动力。

5、结论与建议

上海市低碳城市系统的信息熵值在时间上的动态演化规律表明，上海市低碳城市系统的熵产生表现出平稳并伴有小幅波动的趋势，熵流和总熵均呈现出下降趋势，系统的有序度逐渐增加。上海市应该在现有的良好发展态势的基础上，着重关注低碳

城市的压力源，调整优化能源消费结构，提高清洁能源使用比例与效率，提倡废水废弃物循环利用等，从而为低碳城市建设打下坚实的基础。

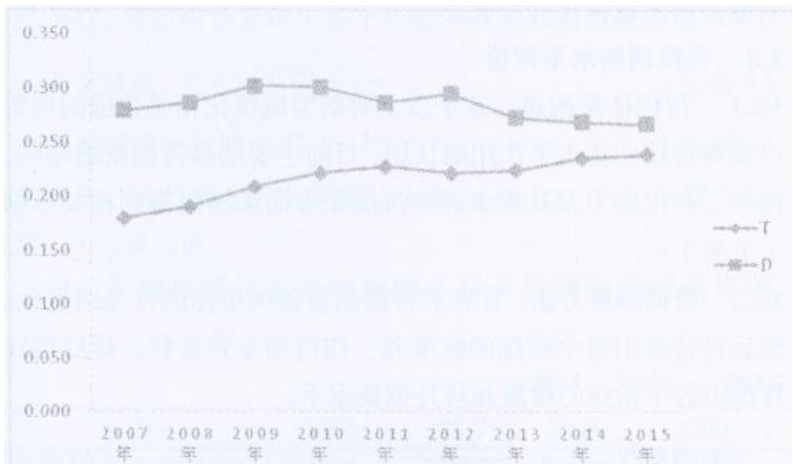


图 2 上海市低碳城市系统综合发展和协调发展指数分析图

在形成熵流的他系统支持型输入指标和他系统压力型输出指标中，森林覆盖率、环境治理投资占比、生活垃圾无害化处理率以及城镇居民人均可支配收入这几个指标的权重相对较高。因此，在低碳城市的建设中，环境的保护与治理应当和社会经济的发展同等重要，经济的稳步增长将会给环境保护治理带来更多的资金投入，同样一个良好的低碳环境更能够为社会经济的发展营造一个友好、和谐的氛围，两者相辅相成。上海市未来应充分提升低碳环境治理功能，加快经济发展模式的转变，做到低碳环境建设与社会经济发展齐头并进，开辟一条更加节能、环保、可循环的低碳经济之路。

基于耗散结构和信息熵理论构建的低碳城市系统熵变指标体系，包括他系统支持输入指标、他系统压力型输出指标、损耗型代谢指标和再生型代谢指标，为低碳城市系统发展的评价研究提供了量化方法。另外，根据实证分析得到的各参数结果，在一定程度上也能够良好地展现出上海市低碳城市发展的整体水平，和实际情况较为符合，为上海市低碳城市发展的动态统计监测与评价提供一定的指导作用。

[参考文献]:

[1]王光辉, 刘怡君, 王红兵. 基于耗散结构理论的城市风险形成及演化机理研究[J]. 城市发展研究, 2014, 21 (11): 81-86.

[2]武萍, 隋保忠, 陈曦. 耗散结构视阈下城镇职工养老保险运行分析[J]. 中国软科学, 2015 (05): 173-183.

[3]辛玲. 低碳城市评价指标体系的构建[J]. 统计与决策, 2011 (07): 78-80.

[4]刘钦普. 国内构建低碳城市评价指标体系的思考[J]. 中国人口. 资源与环境, 2013, 23 (S2): 280-283.

[5]廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999 (02): 76-82.