

DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2014. 0858

武静静 柴立和 赵静静. 2015. 低碳生态城市发展水平评价的新模型及应用——以天津市为例[J]. 环境科学学报, 35(5): 1563-1570

Wu J J ,Chai L H ,Zhao J J. 2015. Development evaluation model of low-carbon eco-city and its application: A case study in Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(5): 1563-1570

# 低碳生态城市发展水平评价的新模型及应用 ——以天津市为例

武静静 柴立和\* 赵静静

天津大学环境科学与工程学院,天津 300072

收稿日期: 2014-06-23 修回日期: 2014-07-28 录用日期: 2014-07-28

**摘要:** 把低碳生态城市考虑成一个包含众多相互耦合的组元的非线性复杂系统,建立起一个评价低碳生态城市发展水平的最大信息熵(MIE)模型,计算了 $\xi$ 参量及系统演化动力学方程,其中 $\xi$ 参量是低碳生态城市系统组元间相互耦合形成的结构模式,表征系统发展水平的高低.同时,对2007—2011年间天津市低碳生态城市发展水平进行了评价.结果表明,2007—2011年天津低碳生态城市发展水平逐渐提高,而以 $\xi$ 值来度量的环比增长速度在2008年达到最大值6.96%. $\xi$ 值各分量的雷达图表明,交通系统的完善、第三产业的发展 and 固定资产投资规模的增大是5年间这一低碳生态城市系统发展的主要推动因素. $\xi-x_i$ 的拟合结果显示,指标的实际值与理论预测值间的误差比较小,证实了MIE模型可以用于低碳生态城市发展水平的预测;与灰色预测法的比较表明,MIE模型可以更准确地对低碳生态城市的发展水平进行评价.本文最后讨论了MIE模型在低碳生态城市发展水平评价上的特点及优势.

**关键词:** 天津市; 低碳生态城市; 最大信息熵(MIE);  $\xi$ 值

文章编号: 0253-2468(2015)05-1563-08 中图分类号: X820 文献标识码: A

## Development evaluation model of low-carbon eco-city and its application: A case study in Tianjin

WU Jingjing , CHAI Lihe\* , ZHAO Jingjing

School of Environmental Science and Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072

Received 23 June 2014; received in revised form 28 July 2014; accepted 28 July 2014

**Abstract:** By considering low-carbon eco-city system as a nonlinear complex system coupled with numerous indexes , Maximum Information Entropy ( MIE ) model was established to evaluate the development level of low-carbon eco-city. Parameter  $\xi$  and system evolutionary dynamics equation were calculated.  $\xi$  was the system structure pattern coupled with low-carbon eco-city indexes that characterized system development level. Then development level of Tianjin low-carbon eco-city in 2007—2011 was evaluated. Results showed that the development level of this system increased gradually in 2007—2011 , with the maximum growth rate of 6.96% measured by  $\xi$  values in 2008. Based on the radar chart partial ratio of  $\xi$  values , we concluded improvement of the traffic system , development of the third industry and investment in fixed assets were the major factors driving the development of the complex system during the five years.  $\xi-x_i$  fitting results showed that the error of actual index value and theoretical prediction value was small which confirmed MIE model could be used for predicting low-carbon eco-city development level. Comparison with grey prediction method indicated that MIE model evaluated low-carbon eco-city development level more accurately. It was concluded that MIE model was advantageous in the development level evaluation of low-carbon eco-city.

**Keywords:** Tianjin; low-carbon eco-city; maximum information entropy ( MIE );  $\xi$  value

### 1 引言( Introduction)

城市作为人类文明的重要载体,在表面变得越发“光鲜”的同时,背后却是沉重而又现实的生态环境危机.低碳生态城市的建设是中国解决环境问

题、促进城市健康发展的一条迫在眉睫而又唯一可行的发展道路.据统计,截至2011年2月,中国已有259个城市提出了低碳生态城市建设的目标,占地级市比例的90.2%,并且这一比例还在稳步增长(李迅等,2011).为使建设工作的开展能有较好的

基金项目: 国家自然科学基金( No. 71071110 , 71273185)

Supported by the National Natural Science Foundation of China ( No. 71071110 , 71273185)

作者简介: 武静静(1989—)女, E-mail: sophiamoyuyun@163.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: lhchai@tju.edu.cn

Biography: WU Jingjing(1989—), female, E-mail: sophiamoyuyun@163.com; \* Corresponding author, E-mail: lhchai@tju.edu.cn

理论指导,对低碳生态城市发展水平进行评价就显得格外重要.国外在这一方面的研究起步较早,主要是对低碳生态城市中的某一个具体问题进行评价. Goodall(2007)建立了评价模型“环境近似调整后的国民生产净值”,说明了减少碳足迹的途径. Phdungsilp(2010)利用 LEAP 模型对曼谷的能源消耗和碳排放进行了研究,提出最重要的节能途径是从私人汽车向公共交通系统转变. Shimada 等(2007)针对低碳经济提出了一种长期的情景设计方法并应用于日本志贺县. 另外,还有一些比较有影响力的评价指标体系,如联合国人居署城市指数、联合国可持续发展指标等(陈晓晶等,2013). 我国针对低碳生态城市的研究起步相对较晚,目前通用的评价指标体系主要参照《中国城市可持续发展指标》. 另外,一些学者也逐渐开始了低碳生态城市的具体评价研究,如仇保兴(2012)在对低碳生态城市的概念进行界定的基础上,提出了指标体系的构建原则,并进行了低碳生态城市示范点案例分析;孙菲等(2014)利用层次分析法和加权指数法对大庆市 2006—2010 年的低碳生态城市建设进行了评价. 另外,因子分析法(关海玲等,2012)、多维目标综合评价方法(赵国杰等,2011)、灰色关联分析法(付丽娜等,2013)等多种评价方法也相继被运用到低碳生态城市发展水平的评价研究上.

尽管有对低碳生态城市发展水平评价的诸多研究,但也存在许多挑战. 至今,国际上对低碳生态城市的评价大多是专题评价,没能提出一个综合指

标来描述整个低碳生态城市的发展状况. 国内的评价大多是定性评价或是简单的定量评价,并且权重的确定主要依靠专家的知识经验,带有主观性,也不能从根本上揭示低碳生态城市系统发展的动力学机制及各个指标微观上的相互作用. 为了克服这些不足之处,本文把低碳生态城市系统考虑成一个典型的复杂系统,是由相互作用的诸要素构成的有机整体,引入信息熵来描述诸要素的相互作用,并用最大信息熵(MIE)方法重构低碳生态城市系统演化的动力学方程,建立一个新的低碳生态城市发展水平的评价模型,并利用该模型以天津市 2007—2011 年间的低碳生态城市发展水平为案例进行定量评价与预测.

## 2 基于 MIE 的低碳生态城市发展水平评价模型 (Development evaluation model of low-carbon eco-city based on MIE)

生态城市是一个由大量组元相互作用而形成的非线性复杂系统,在低碳意义上,它可以被考虑成一个由资源节约、经济持续、环境友好、社会和谐等多种意义上的基本组元(指标)相互耦合而形成的复杂网络,具体如图 1a 所示. 在该网络中,组元之间通过相互竞争、不断与外界交换物质和能量,涌现出时空有序的功能结构. 一旦刻画出此功能结构的演化特性,就可以从组元(指标)间的相互作用动力学角度对低碳生态城市发展水平进行评价.

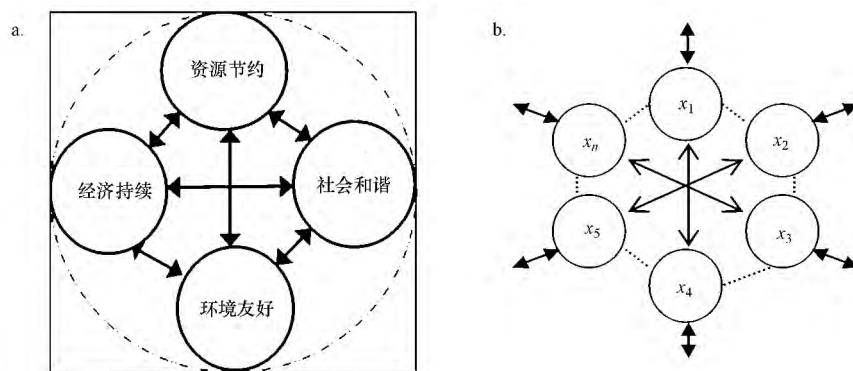


图 1 低碳生态城市系统的分析模型 (a. 由组元(指标)相互耦合而形成的复杂网络, b. 组元(指标)相互耦合的分析模型)

Fig. 1 Analytical model of low-carbon eco-city system ( a. complex network consisted of coupled elements ( indexes ) , b. analytical model for coupled elements ( indexes ) )

本文把图 1a 所示的复杂网络的组元定义为  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , 对组元的特性用  $x_1, x_2, \dots, x_n$  来表示(图 1b), 写成向量的形式为  $\mathbf{x} = (x_1, x_2,$

$\dots, x_n)$ . 类似经典信息熵(Haken, 2006), 我们可以力所能及地考虑该网络组元之间的所有联系(进而形成信息)的参量作为低碳生态城市的信息

熵  $S_j$ :

$$S_j = \int \rho J dx = \int \rho(x, t) (\eta + \sum_i \gamma_i x_i + \sum_{ij} \gamma_{ij} x_i x_j + \sum_{ijk} \gamma_{ijk} x_i x_j x_k + \dots) dx \quad (1)$$

式中  $\rho(x, t)$  为概率密度,  $J$  为不均匀联系的分布函数. 类似笛卡尔乘积,  $\eta, \gamma$  为耦合作用系数. 低碳生态城市系统在演化过程中会受到各种条件如技术、政策等的限制, 将这些限制条件定义为约束条件, 它表现为网络的组元或节点应满足一定的守恒关系, 如质量、能量、动量守恒等. 这些守恒关系可一般化地用  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的形式表达为:

$$\langle x_i \rangle = f_1, \langle x_i x_j \rangle = f_2, \langle x_i x_j x_k \rangle = f_3, \langle x_i x_j x_k x_l \rangle = f_4 \quad (2)$$

式中,  $\langle \rangle$  表示求统计平均值, 如  $\langle x_i \rangle = f_1$  即为  $\sum_i \rho_i x_i = f_1$ . 当然  $f_1 \sim f_4$  是较难获得的, 此处为推导出模型, 暂时认为它们是可获得的. 这样, 应用 MIE 方法 (Feng et al., 2008), 即让式 (1) 在约束条件 (2) 下达到最大化, 可得概率密度函数  $\rho(x, t)$ :

$$\rho(x, t) = e^{\mu + \sum_i \sigma x_i + \sum_{ij} \sigma_{ij} x_i x_j + \sum_{ijk} \sigma_{ijk} x_i x_j x_k + \dots} = e^{\phi(\sigma, x)} \quad (3)$$

式中  $\phi$  是图 1a 所示复杂网络的势函数, 控制着低碳生态城市系统由组元相互作用涌现出有序功能结构的动力学过程. 该动力学过程由  $\mu, \sigma$  这样的参数控制, 而  $\mu, \sigma$  的确定取决于  $f_1 \sim f_4$  (Chai et al., 2004; 2002).  $f_1 \sim f_4$  的难获取促使我们必须考虑对  $\phi$  作相应的处理, 为此引入变换:

$$x_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} \xi_i \text{ 或 } \xi_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} x_i \quad (4)$$

式 (3) 的势函数可转化为:

$$\bar{\Phi}(\lambda, \xi) = \zeta + \sum_{k=1}^n \lambda_k \xi_k^2 + \dots \quad (5)$$

式 (4) 中  $a_{ki}$  表示低碳生态城市系统评价指标  $x_i$  之间的连接权值,  $\xi_k$  是低碳生态城市系统组元  $x_i$  相互关联而形成的所有可能结构模式. 因此, 我们有了一个刻画低碳生态城市系统功能结构的描述参量.

由式 (5) 可以得到刻画低碳生态城市系统功能结构的描述参量演化的动力学方程 (Chen et al., 2006):

$$\dot{\xi}_k = \lambda_k \xi_k + S_k(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) + F_k(t) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中  $S_k$  是非线性作用函数, 反映组元 (或可能的结构模式  $\xi_k$ ) 间的相互作用,  $F_k$  为随机函数. 式 (6) 或式 (5) 中的  $\lambda_k$  代表各种可能的功能结构模式  $\xi_k$  所对

应的特征值. 低碳生态城市系统内部组元的竞争、协同等相互作用 (在模型中用  $a_{ki}$  的数值和正负号来描述其相互作用的关系、大小) 调节了系统功能结构的运行状态、趋势, 即系统组元间通过不同的合作和竞争方式形成不同的功能结构模式  $\xi_k$ . 式 (6) 反映的就是由变化的组元 (指标)  $x_1, x_2, \dots, x_n$  驱动的动力学演化过程. 由于  $f_1 \sim f_4$  较难获得, 所以用组元  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的数据校正该方程中的待定常数 (如  $\mu, \sigma, a_k, \lambda_k$  等), 并获得对应每一组组元的  $\xi_k$  (下文简写成  $\xi$ ), 由此揭示低碳生态城市系统的功能结构变化特征, 并对其进行评价. 这样本文就建立了基于 MIE 的低碳生态城市发展水平评价模型.

SOM 神经网络, 即自组织映射神经网络的工作机理与式 (6) 的动力学过程相似, 它能抓住输入数据的特征, 自动组织其空间结构, 并能无监督地进行自组织学习, 与 MIE 模型控制下的复杂开放系统演化过程具有对应性. 将低碳生态城市系统的组元  $x_1, x_2, \dots, x_n$  映射到 SOM 网络中的人工神经元上, 通过模拟激发某个神经元产生连接权值  $w_{ij}$  (对应着权值向量  $a_{ki}$ ), 具体见图 2 (赵帅等, 2013a), 同时获得结构  $\xi_k$  的波动过程. 这样, 就可借助 SOM, 利用 Matlab 软件, 对理论模型编程, 实现对式 (6) 的求解, 即校正该式中的待定常数 (如  $\mu, \sigma, a_k, \lambda_k$  等), 获得对应每一组给定  $x_1, x_2, \dots, x_n$  数据的  $\xi$ , 由此量化模拟低碳生态城市系统的功能结构的变化特征, 实现对低碳生态城市发展水平的量化评价.

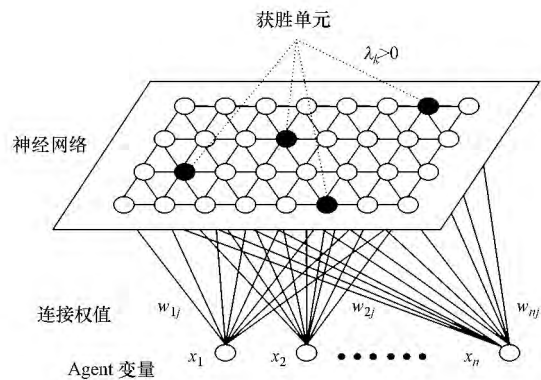


图 2 与理论对应的动力学模拟系统示意图  
Fig. 2 An illustration of dynamic simulation system

### 3 天津低碳生态城市评价与结果分析 (Evaluation and results analysis of Tianjin low-carbon eco-city)

#### 3.1 天津低碳生态城市发展水平评价指标选取

近年来, 天津被定位为“环渤海地区经济中心、国际港口城市、北方经济中心、生态城市”, 以此为

契机,以增强可持续发展能力和经济竞争力为总目标,天津市正拟逐步探索出一条适合天津发展的低碳生态城市之路.因此,科学、合理地评价天津市低碳生态城市的建设水平非常重要.本文以天津市为例,利用所建立的 MIE 模型对天津市 2007 - 2011 年的低碳生态城市建设水平进行定量评价.

根据模型可知,对任何具体的研究对象而言,首先在组元或指标( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )的选择上,最普遍的方法就是把所有组元都考虑进来,计算出总体

模式  $\xi$ ,再由  $\xi - x_i$  关联来淘汰关联性最差的,重复进行直至满足发现稳定模式的要求为止.但实际上,可以充分运用已有的知识建立一套具有系统性、完备性、可测性、实用性、可比性的指标体系来展开评价.本文主要以仇保兴(2012)在《兼顾理想与现实——中国低碳生态城市指标体系构建与实践示范初探》一书中建立的低碳生态城市评价指标体系及路立等(2011)建立的指标体系为依据,确定了天津市低碳生态城市评价指标体系,具体见表 1.

表 1 天津市低碳生态城市评价指标体系  
Table 1 Tianjin low-carbon eco-city assessment indexes

选取意义	序号	指标	单位
资源节约	1	人均建设用地面积	$m^2 \cdot 人^{-1}$
	2	单位 GDP 能耗(以标准煤计)	$t \cdot 万元^{-1}$
经济持续	3	第三产业增加值占 GDP 比重	
	4	城镇登记失业率	
	5	研究与实验发展经费支出占 GDP 比重	
	6	恩格尔系数	
	7	城镇居民人均可支配收入	元
环境友好	8	空气质量达到二级以上天数比率	
	9	城市饮用水水源地水质达标率	
	10	生活垃圾无害化处理率	
	11	工业固体废物综合利用率	
	12	城市区域环境噪声平均声级	dB
	13	森林覆盖率	
	14	工业用水重复利用率	
	15	城市污水日处理能力	万 $m^3$
社会和谐	16	城乡收入比	
	17	城市每万人拥有公共交通工具数	辆
	18	水利、环境和公共设施管理业固定资产投资	亿元

为校正式(6)中的待定常数,获得  $\xi$  的解以揭示低碳生态城市系统功能结构的变化特征,必须获得一些  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的数据.本研究采用的数据源主要是《天津市城市统计年鉴》、中国经济社会发展统计数据库及中华人民共和国国家统计局;对于无

法直接获得的数据(如人均建设用地面积),参考相关研究成果(仇保兴,2012),根据相关数据计算获得.获取的系统组元或指标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  数据标准化后见表 2.

表 2 天津低碳生态城市评价指标标准化数据  
Table 2 Assessment indexes data of Tianjin low-carbon eco-city

年份	各指标标准化数据																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2007	1.169	0.840	0.960	1.000	0.935	1.026	0.755	1.015	1.000	0.970	0.999	0.998	0.993	1.013	0.897	1.014	0.927	0.358
2008	1.041	0.902	0.962	1.000	1.016	0.971	0.896	1.021	1.000	0.972	0.997	0.998	0.993	0.977	0.989	0.963	1.004	0.784
2009	0.929	1.020	1.014	1.000	0.976	0.992	0.987	0.973	1.000	0.980	0.998	0.998	1.005	1.007	0.990	0.960	1.025	1.145
2010	0.931	1.032	1.029	1.000	1.016	1.010	1.121	0.977	1.000	1.039	1.000	1.000	1.005	1.001	1.044	0.981	1.046	1.372
2011	0.931	1.207	1.034	1.000	1.057	1.001	1.242	1.015	1.000	1.039	1.006	1.004	1.005	1.001	1.081	1.082	0.997	1.340

### 3.2 天津低碳生态城市系统发展演化过程

有了组元及其给定的一组数据, 就可以求解式(6). 将标准化后的指标数据借助 Matlab 平台利用 SOM 网络, 采取  $3 \times 2$  的网格数设定 400 步对动力学式(6)进行神经网络模拟, 得到的结果见图 3. 图 3 显示的是在演化过程中, 低碳生态城市系统内部组元之间相互关联和耦合, 不断进行竞争和自组织作用, 并最终获得每一组给定  $x_1, x_2, \dots, x_n$  数据下  $\xi$  的过程. 系统内部组元在外界条件的约束下, 不断地进行竞争、协作、自组织. 在前 200 步的相互作用中,  $\xi$  值波动比较大, 这说明低碳生态城市系统发展状况的可能取值范围比较大. 在  $t$  为 300 ~ 400 步时, 各年  $\xi$  值基本维持相对稳定水平, 说明该阶段的系统模式已处于稳定阶段, 且该阶段的发展模式是通过系统组元经过一段时间的相互作用和反馈得到的, 因此, 是“获胜模式”.  $\xi$  值逐渐趋于动态的稳定状态, 意味着最终趋向于每一组给定  $x_1, x_2, \dots, x_n$  数据下的低碳生态城市系统功能结构.

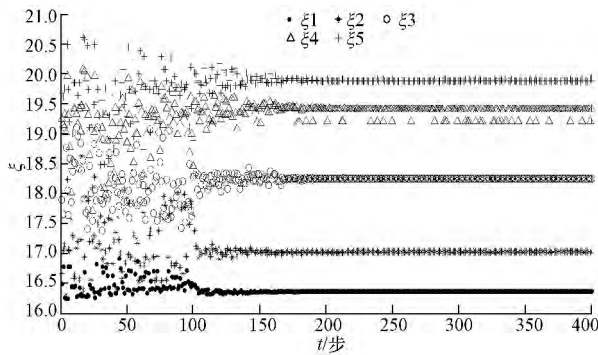


图 3 天津低碳生态城市的功能结构演化波动图

Fig. 3 Functional structural evolution of Tianjin low-carbon eco-city

将模拟得到的表征天津低碳生态城市发展水平的每一组给定  $x_1, x_2, \dots, x_n$  数据下的  $\xi$  值整理后作柱形图, 结果见图 4. 从图 4 可以看出, 在 2007—2011 年连续 5 年间  $\xi$  值逐渐变大, 说明天津低碳生

态城市系统组元间的耦合关系越来越紧密, 广义流交换越来越频繁, 结构越来越复杂, 也越来越成熟.  $\xi$  值由 2007 年的 16.373 增长到 2011 年的 19.841, 环比增长速度依次为 4.08%、6.96%、6.32%、2.39%, 显示了天津低碳生态城市系统在初期发展势头比后期迅猛, 这与其它一切复杂系统的发展过程是相似的. 这一切得益于在天津市转型发展过程中, 政府各项工作力度的加强对于低碳生态城市的建设起到了明显的促进作用, 城市发展过程中各种“人-自然-城市”之间的不协调、不和谐的问题在发展中得到了较为有效的解决.

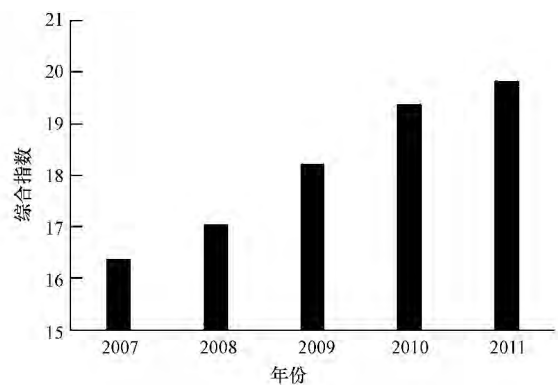


图 4 反映天津低碳生态城市发展水平的综合指数  $\xi$  的变化

Fig. 4 Variation of comprehensive index  $\xi$  of Tianjin low-carbon eco-city

### 3.3 由 $\xi$ 值各分量的雷达图表征的天津市低碳生态城市发展水平的演化

由 SOM 神经网络模拟得到的各指标的连接权值见表 3. MIE 模型将低碳生态城市系统看作是一个处于联系中的复杂网络, 连接权值表示的是网络中各指标与周围环境交换广义流能力的大小, 对系统发展做贡献的能力大小. 由于每年系统状况、周围环境都不同, 因此, 连接权值也处于不断变化之中.

表 3 评价指标的连接权值  
Table 3 Connection weights of evaluation indexes

年份	$a_{ki}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2007	0.9607	0.8606	0.8020	1.0170	1.0000	0.9707	0.9983	0.9980	0.9930	1.0010	0.9276
2008	0.9748	0.9169	0.8844	1.0072	1.0000	0.9736	0.9978	0.9980	0.9961	0.9936	0.9665
2009	1.0104	1.0347	1.0440	0.9914	1.0000	1.0013	0.9997	0.9995	1.0026	0.9987	1.0178
2010	1.0274	1.0914	1.1341	0.9896	1.0000	1.0259	1.0017	1.0010	1.0050	1.0023	1.0451
2011	1.0277	1.1017	1.1413	0.9918	1.0000	1.0259	1.0020	1.0012	1.0050	1.0023	1.0473

为了更清楚地分析天津低碳生态城市系统发展水平的演化状况,以及各个指标对系统所做贡献的多少,根据 MIE 模型的原理及表 3 作雷达图(图 5)。图 5 显示了天津低碳生态城市发展过程中每个年限的具体结构形态,每个坐标轴上覆盖部分的延伸程度表示对应的指标对系统发展的贡献即  $\xi_{ki}$  ( $\xi_{ki} = a_{ki} \times x_i$ )。总的灰色面积表示组元耦合形成的系统结构模式。从整体来看,从 2007 年至 2011 年,发展过程中雷达图覆盖的面积越来越大,说明天津低碳生态城市这一系统接受的广义流越来越多,信息交流越来越强烈,系统发展水平逐渐提高,系统结构逐渐接近完善。图 5 也可以显示出各个组元之间的相互作用,MIE 模型将低碳生态城市这一系统看作

一个整体模式,不再机械地考虑两个组元间的关系,而是把组元置于整体模式中观察对比。从图中可以看出,环境友好方面的组元(第 8~15 个指标)在研究期间内对低碳生态城市系统的贡献变化微弱,但各个组元耦合程度较强,不容易受到外来因素的影响。在资源节约方面,人均建设用地面积在 2007—2010 年对系统的影响不大,而单位 GDP 能耗则对低碳生态城市的建设起了较大的作用。经济持续方面,随着第 3~7 个组元耦合作用的增强,第三产业增加值占 GDP 比重、城镇居民人均可支配收入发展变化较大,到 2009 年 5 个组元基本协调一致,2009 年之后竞争作用又逐渐增强。社会和谐意义上的组元在整个系统演化过程中变化最突出,城市每万人

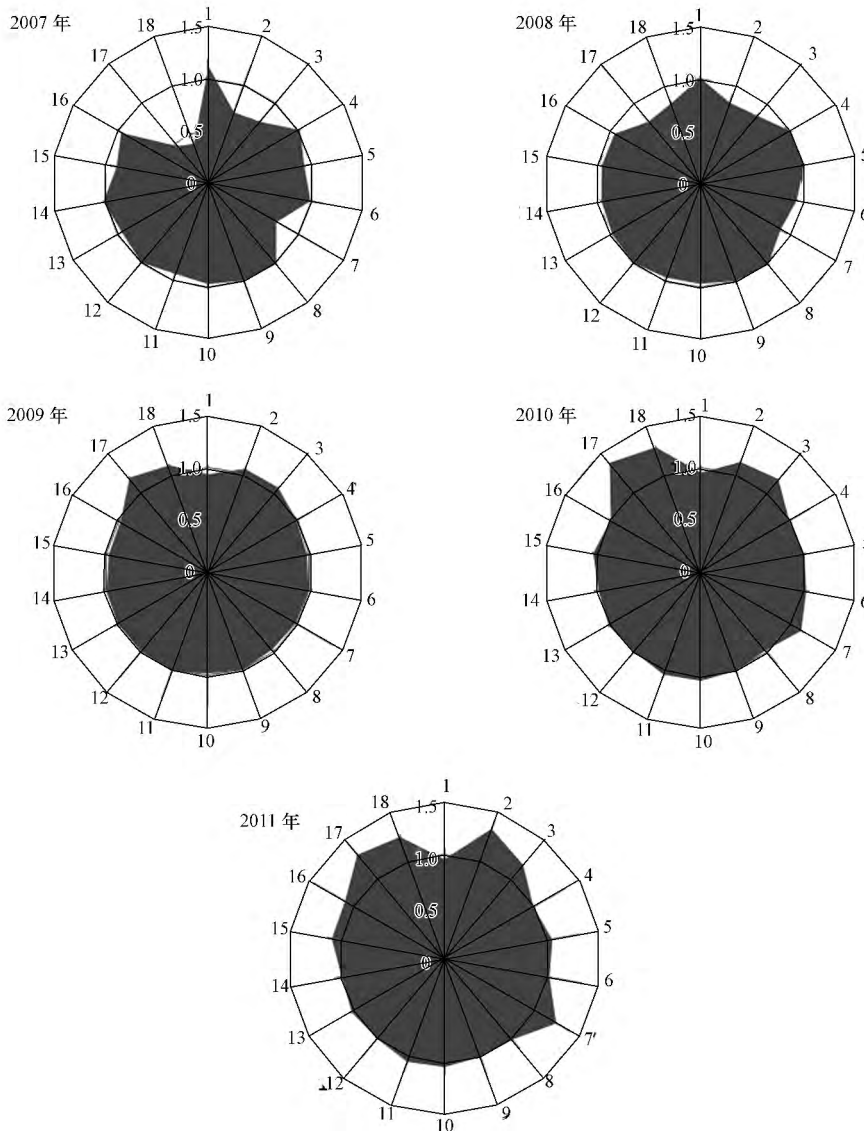


图 5 天津低碳生态城市系统演化过程

Fig. 5 Development progress of Tianjin low-carbon eco-city system

拥有公共交通工具数、环境和公共设施管理业固定资产投资对系统的发展演化做了很大的贡献,是促进天津低碳生态系统发展的重大因素. 上述模拟结果与天津市的实际情况相符,在《天津市城市总体规划》(2005—2020)中就指出,天津市在未来发展中,要完善陆路交通体系,加大地铁运营、开辟公交线路的力度,加大固定资产投资力度. 针对第三产业而言,2011年天津市旅游业收入达1660亿元,占GDP的比重达5.8%(唐茂华等,2013). 2012年第三产业增加值达到6049.96亿元,占全市生产总值的47%.

### 3.4 天津市低碳生态城市发展水平的预测

MIE模型也能用于低碳生态城市发展水平的演化趋势的预测. 由于整个系统是耦合在一起的,因此,可以根据某个组元数据通过拟合关系式来预测其他组元的数据及反映总体结构的 $\xi$ 值. 具体的预测调控方法是在 $\xi-x_i$ 关联图上作相应的延展或插值,以此再现协同相互作用的动力学过程及在协同相互作用下整体模式的演化. 认知、预测、调控世界万象时,知道某个 $x_i$ 是必要的,它相当于一个初步期待、观察的冲动,这实际上意味着由这样的初步期待来完成对复杂系统自我模式进行认知、预测、调控. 根据以上分析结果,选取在研究期间内对天津

低碳生态城市系统作用比较大的几个指标,包括第三产业增加值占GDP比重、城市居民人均可支配收入、城市每万人拥有公共交通工具数,以及水利、环境和公共设施管理业固定资产投资4项指标为例. 先作出这4项指标的 $\xi-x_i$ 拟合关系,求出可决系数 $R^2$ ,发现这4项指标与 $\xi$ 的可决系数均较高,说明它们能够很好地反映天津低碳生态城市的发展水平. 把2012年第三产业增加值占GDP比重值47%代入拟合关系中,求出 $\xi$ 值为21.6491,进而根据 $\xi$ 值求出其它3项指标的理论值,并将其与实际值相比(表4). 结果表明,指标的实际值与理论预测值间的误差均比较小,证实了本文建立的模型可以用于低碳生态城市复杂系统的预测. 在实际工作中,当城市规划管理人员需要了解城市在未来特定几年后的发展水平时,就可以利用该模型根据某个指标在那个年份的设定期望值进行情景预测. 当然,由于近两年某些指标的数据还未查询到,因此,本文只选取了5年的时间来评价天津低碳生态城市的发展水平,这可能会对预测造成一点偏差. 将来随着更丰富数据的补充,可获得更准确的 $\xi-x_i$ 拟合关系,因而对未来几年后系统发展水平的预测, $\xi$ 随时间的变化趋势将更准确.

表4 模型的预测值与实际值的对比

Table 4 Comparison of actual values and predictive values from model

指标序号	拟合关系	$R^2$	$x_i$ (实际值)	$x_i$ (预测值)	$\xi$ (2012年)	误差
3	$\xi = 3151.2x_3^2 - 2711.3x_3 + 599.86$	0.9732	47%	0.470	21.6491	0%
7	$\xi = -3 \times 10^{-9}x_7^2 + 0.0005x_7 + 8.9101$	0.9720	29626	31389.675	21.6491	5.62%
17	$\xi = 1.8629x_{17}^2 - 50.548x_{17} + 359.01$	0.9956	17.34	15.290	21.6491	-13.41%
18	$\xi = 7 \times 10^{-6}x_{18}^2 - 0.0022x_{18} + 16.53$	0.9997	917.9	1026.000	21.6491	10.54%

注: 指标 $x_7$ 、 $x_{17}$ 、 $x_{18}$ 的单位分别为元、辆、亿元.

### 3.5 MIE模型与GM比较

在上述预测的基础上,将利用MIE模型得到的2007—2012年天津低碳生态城市发展综合指数 $\xi$ 与利用灰色预测模型(GM)(郝文升,2012)得到的发展度相比. 结果见图6. 虽然方法不同,两者的数值大小不能直接相比,但可以对它们的走势情况进行分析比较. 由图6可以看出,两种方法评价的天津低碳生态城市发展水平走势有所差别. MIE模型评价的天津低碳生态城市发展水平在2007—2012年间一直处于上升状态,而GM方法的评价结果则显示2010年和2011年该系统的发展水平有所下降. 利用模型得到的对天津低碳生态城市发展作用较大的

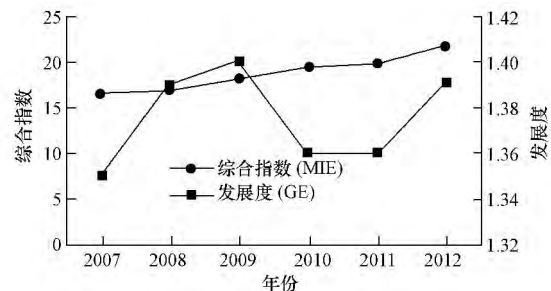


图6 MIE模型与GM的比较

Fig. 6 Comparison of MIE and GM

指标在2012年的理论值与实际值误差在可控范围内,表明了 $\xi-x_i$ 拟合关系的正确性及模拟得到的 $\xi$

趋势的正确性,加之 MIE 模型在城市生态系统健康评价(赵帅等,2013b)、单位 GDP 能耗分析(程宏鑫,2012)等方面的成功应用为本研究奠定了基础,因此,可判断 MIE 模型分析结果的可靠性及较 GM 方法评价结果的合理性。

本文为低碳生态城市发展水平的定量评价提供了一个 MIE 模型,该新模型有以下几个优点:第一,当获得一个低碳生态城市系统的指标数据时,输入该模型,最终得到的“获胜模式”就代表这个系统低碳生态城市的发展水平,且可用具体的综合参量  $\xi$  值来量化评价,可操作性强;第二,利用 MIE 模型进行低碳生态城市发展水平的评价时不必预先确定各个指标的权重,它在模拟过程中能自动调整低碳生态城市系统各指标之间的关系,融入了组元相互作用的动力学,克服了之前的方法权重确定的主观性的缺陷,同时  $\xi$  值对应的分量( $a_{ki} \times x_i$ )得出的雷达图可方便地反映系统的空间演化和各因素的影响;第三,MIE 模型在预测低碳生态城市系统未来的发展演化趋势方面也有较好的潜力。

#### 4 结论(Conclusions)

本文从复杂系统组元相互作用动力学的角度建立了评价低碳生态城市发展水平的 MIE 模型,筛选了天津低碳生态城市的评价指标,对天津市 2007—2011 年的低碳生态城市建设水平进行了评价。对反映低碳生态城市发展水平的  $\xi$  值计算表明,天津市在 2007—2011 年间的低碳生态城市建设水平在逐渐提升,并且在研究初期的增长速度快于研究后期。 $\xi$  值各分量的雷达图揭示,天津市交通体系的完善、产业系统的优化、固定资产投资规模的增大为天津低碳生态城市的建设做了很大的贡献。利用天津市低碳生态城市发展水平的预测及评价/预测结果与 GM 方法的比较对 MIE 模型的科学性进行了检验,发现本文建立的 MIE 模型较为可靠,合理。

致谢(Acknowledgements): 本研究成果离不开导师柴立和副教授的悉心指导,在本课题的研究中,同课题组的赵静静、王影等同学给了我很多启发,在日常交流及探讨中提出了许多宝贵意见,在此一并致谢。

责任作者简介:柴立和(1972—),男,副教授,主要研究方向为非线性科学及复杂系统的模拟。E-mail: lhchai@tju.edu.cn.

#### 参考文献(References):

- Chai L H, Shoji M. 2002. Self-organization and self-similarity in boiling systems[J]. *Journal of Heat Transfer*, 124(3): 507-515
- Chai L H, Wen D S. 2004. Hierarchical self-organization of complex systems[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 20(4): 440-445
- Chen L M, Chai L H. 2006. A theoretical analysis on self-organized formation of microbial biofilms[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 370(2): 793-807
- 陈晓晶, 孙婷, 赵迎雪. 2013. 深圳市低碳生态城市指标体系构建及实施路径[J]. *规划师论坛*, 29(1): 15-19
- 程宏鑫. 2012. 单位 GDP 能耗的信息熵模型及其分析[D]. 天津: 天津大学
- 仇保兴. 2012. 兼顾理想与现实—中国低碳生态城市指标体系构建与实践示范初探[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 25-45
- Feng Q Y, Chai L H. 2008. A new statistical dynamic analysis on vegetation patterns in land ecosystems[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(14): 3583-3593
- 付丽娜, 贺灵. 2013. 基于灰色关联分析的低碳生态城市评价研究[J]. *湘潭大学学报: 哲学社会科学版*, 37(3): 31-35
- Goodall C. 2007. How to Live a Low-Carbon Life: The Individual's Guide to Stopping Climate Change[M]. London Sterling, VA: Earthscan. 56-68
- 关海玲, 孙玉军. 2012. 我国省域低碳生态城市发展水平综合评价——基于因子分析[J]. *技术经济*, 31(7): 91-98
- Haken H. 2006. Information and self-organization: A macroscopic approach to complex systems[M]. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc
- 郝文升. 2012. 低碳生态城市过程创新与评价研究——以天津市为例[D]. 天津: 天津大学
- 李迅, 刘琰. 2011. 中国低碳生态城市发展的现状、问题与对策[J]. *城市规划学刊*, (4): 23-29
- 路立, 田野, 张良, 等. 2011. 天津城市规划低碳评估指标体系研究[J]. *城市规划*, 35(21): 26-31
- Phdungsilp A. 2010. Integrated energy and carbon modeling with a decision support system: policy scenarios for low-carbon city development in bangkok[J]. *Energy Policy*, 38(9): 4808-4817
- Shimada K, Tanaka Y, Gomi K *et al.* 2007. Developing a long-term local society design methodology towards a low-carbon economy: an application to Shiga prefecture in Japan[J]. *Energy Policy*, 35(9): 4688-4703
- 孙菲, 纪锋, 王怡. 2014. 大庆市低碳生态城市建设评价[J]. *辽宁工程技术大学学报(社会科学版)*, 16(2): 145-148
- 唐茂华, 陈丹. 2013. 天津市进一步加快服务业发展的重点领域与策略[J]. *城市*, (3): 8-10
- 赵国杰, 郝文升. 2011. 低碳生态城市: 三维目标综合评价方法研究[J]. *城市发展研究*, 18(6): 31-36
- 赵帅, 柴立和. 2013a. 流域水资源丰富度评价的 MFP 模型及应用[J]. *长江流域资源与环境*, 22(6): 698-704
- 赵帅, 柴立和, 李鹏飞, 等. 2013b. 城市生态系统健康评价新模型及应用——以天津市为例[J]. *环境科学学报*, 33(4): 1173-1179