

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0618

徐鹏, 林永红, 栾胜基. 2016. 低碳生态城市建设效应评估方法构建及在深圳市的应用[J]. 环境科学学报, 36(4): 1457-1467

Xu P, Lin Y H, Luan S J. 2016. Establishment of approach to assess the effects of low-carbon eco-city development and its application in Shenzhen City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(4): 1457-1467

低碳生态城市建设效应评估方法构建及在深圳市的应用

徐鹏¹, 林永红², 栾胜基^{1,2,*}

1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

2. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055

收稿日期: 2015-05-16 修回日期: 2015-07-25 录用日期: 2015-08-14

摘要: 在推进生态文明建设、应对气候变化和解决环境问题的背景下, 低碳生态城市已经成为未来城市发展转型的必然趋势。为了指导实现城市有序健康的发展, 初步提出了一种低碳生态城市建设效应评估模型。在基于“压力-状态-响应”综合评估模型、系统动力学模拟模型和调控潜力分析的基础上, 构建现状水平和未来演变趋势相结合的认识框架, 综合考虑当地自然资源安全, 定量表达社会活动、低碳经济和生态环境之间的相互依赖、相互制约的关系, 确定指标调控方向和潜力。最后, 基于该模型对深圳市进行了案例研究, 结果表明: 深圳市评估指数从 2009 年“IV 级: 较低”提升到 2013 年“III 级: 中等”, 在维持现状规模和高速发展速度下, 2020 年达到“II 级: 较高”水平(61.7), 尽管保持增长趋势, 但呈现增长缓慢甚至“饱和”状态。因此, 依旧有必要优化调控深圳市低碳生态城市建设中社会经济发展和模式, 进一步落实和强化深圳市低碳生态产业结构调整 and “海洋强市”等措施。

关键词: 低碳生态城市; 城市健康评估; 系统动力学; 指标调控

文章编号: 0253-2468(2016)04-1457-11 中图分类号: X32 文献标识码: A

Establishment of approach to assess the effects of low-carbon eco-city development and its application in Shenzhen City

XU Peng¹, LIN Yonghong², LUAN Shengji^{1,2,*}

1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871

2. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055

Received 16 May 2015; received in revised form 25 July 2015; accepted 14 August 2015

Abstract: Low-carbon eco-city has become the inevitable trend of future urban development and transformation under the background of promoting the development of ecological civilization, addressing climate change and solving environmental problems. To guide the healthy and orderly urban development, the model is proposed to assess the effects of low-carbon eco-city development. Different with traditional studies, the conceptual framework emphasizes the current conditions and future trends based on “Pressure-State-Response” comprehensive assessment model, system dynamics simulation model and regulation potentiality analysis, considering the local natural resource security, quantitative expression the mutually dependent and interacting relationship between social activities, low-carbon economy and ecological environment as well as confirming the potential and direction of indicator regulation. The proposed assessment model was then applied to Shenzhen, and the results indicate that the assessment index for Shenzhen increased from level IV at 2009 to level III at 2013, and would arrive at 61.7 (level II) at 2020 with the same control levels and developing rate. The growth rate of the assessment index became slower and would become even “saturated” state. Therefore, it is still necessary to optimize the direction and pattern of socio-economic development during low-carbon eco-city construction, and further implement and strengthen the measures in industrial restructuring and “Marine city” building in Shenzhen.

Keywords: Low-carbon eco-city; urban development health; system dynamics; indicator regulation

基金项目: 国际科技合作专项 (No.2012DFG92020)

Supported by the International Science & Technology Cooperation Program of China (No.2012DFG92020)

作者简介: 徐鹏 (1989—), 男, 博士研究生, E-mail: xupenglzl@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: luansj@pkusz.edu.cn

Biography: XU Peng (1989—), male, Ph.D. candidate, E-mail: xupenglzl@163.com; * Corresponding author, E-mail: luansj@pkusz.edu.cn

1 引言(Introduction)

随着我国城市化进程的不断加速,城市化在扩展城市规模、完善公共服务设施、改善居民物质生活和精神文明的同时,还加剧了人口、资源和生态环境之间的矛盾,从而造成人居环境恶化、资源过度消耗和环境污染加剧等一系列问题(郝文升等, 2012; Yu, 2014).城市是一个由社会、经济和环境组成的复杂巨系统,又是温室气体产生、资源消耗和污染物排放的主体和集中地,故城市化进程必须协调好各部分之间的关系,实现城市的可持续发展(唐建青等, 2013).然而,Angel等(2005)在对全球城市扩张的动力研究的过程中,指出20世纪的城市发展模式将无法满足21世纪的城市化需求.故在推进生态文明建设、应对气候变化和解决环境问题的背景下,低碳生态城市建设已经成为城市发展转型的必然趋势.截至2011年2月,在中国287个地级及以上城市中,已有90.2%的城市提出低碳生态城市有关建设目标(李迅, 2012).因此,有必要准确、客观和合理地开展低碳生态城市建设效应评估,以此来指导实现城市有序健康的发展(孙菲和罗杰, 2011).

事实上,低碳生态城市这一概念是由我国学者仇保兴于2009年“国际城市规划与发展论坛”上首次提出(李迅和刘琰, 2011).近年来已经有研究者开展了一定规模的低碳生态城市内涵、指标体系构建和评估(de Jong *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; Bunning, 2014; 郝文升等, 2014; 武静静等, 2015),然而,还有如下几个方面需要进一步加强:①从动态发展的角度看“社会活动-低碳经济-生态环境”(SLEE)的关系,以往的研究评估结果多关注历史或现状的静态水平(Li *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2015),没有考虑其未来动态演变趋势的信息;②综合考虑当地的自然资源安全,构建发展性、代表性和可操作性强的指标体系,在以往的研究中主要以陆域空间为主(杨晓春等, 2010; 王吉勇等, 2012),特别是针对一些沿海城市,忽视了海域低碳生态建设以及海陆域所具有的低碳和生态共生价值,另外,指标体系庞大复杂或过分精简(朱洪祥等, 2012),难以在全面性和精简性之间找到平衡点;除此之外,③本研究通过“压力-状态-响应”(PSR)模型与系统动力学(SD)模型耦合,定量表达SLEE之间的相互依赖、相互制约的关系,然后

进行调控潜力分析,而以往的研究大多是定性或简单定量评估,并且缺乏对指标调控方向和潜力的估计(Cao and Li, 2011; 樊行等, 2012; 姚元和, 2013; 丁冬梅, 2012; 张东升等, 2013).

目前,低碳生态城市正成为城市转型发展的全球共识和时代主题,现阶段各国适应和减缓气候变化的重要战略.鉴于此,本研究以深圳市为例,从SLEE耦合角度,基于PSR模型、SD模型和调控潜力分析,构建现状水平和未来演变趋势相结合的认识框架,提出一种基于“PSR模型-系统仿真-调控”耦合的低碳生态城市建设效应评估模型,从而为决策者提供关键的决策支持信息,更好地指导和推进低碳生态城市建设.

2 研究对象与方法(Research objects and methods)

2.1 研究对象

深圳市位于广东省南部沿海,陆地范围为 $113^{\circ}46' \sim 114^{\circ}37'E$, $22^{\circ}27' \sim 22^{\circ}52'N$ 之间,东临大亚湾,西濒珠江口伶仃洋,南至深圳河与香港毗邻,北与东莞市、惠州市接壤.全市陆地总面积 1996.78 km^2 ,土地形态以低山、平缓台地和阶地丘陵为主,平原占陆地面积22.1%,森林覆盖率44.6%;海洋水域总面积 800 km^2 ,海岸线长229.96 km,海岸资源丰富;深圳市属亚热带海洋性气候,气候温和,年平均气温 $22.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$;雨量充沛,每年4—9月为雨季,年降雨量1933.3 mm;常年主导风向为东南偏东风(http://www.sz.gov.cn/cn/zjsz/sznj/201306/t20130603_2154995.htm).深圳市2013年末常住人口为1062.89万人,全年本市生产总值为14500.23亿元(可变价),第三产业增加值占全市生产总值的比重为56.6%.于2010年1月,深圳市与住房和城乡建设部签署共建“国家低碳生态示范市”合作框架协议,重点探索在南方气候条件和城市发展转型下的“渐进常态化”低碳生态城市的规划建设模式,深圳已成为全国首个低碳生态示范市(陈晓和叶伟华, 2011).

2.2 低碳生态城市建设效应评估概念框架

本研究在低碳化手段和生态化理念下,应用评估(PSR模型)、模拟(SD模型)和调控潜力分析相结合的方法,构建一种低碳生态城市建设效应评估模型(图1).从城市SLEE系统动力学特征来看,描述低碳生态城市建设效应应包括正向作用和逆向反馈两个特征,即低碳生态建设效应评估范畴包含

“三产”发展结构、规模和布局正向地所产生直接碳排放和间接影响海陆域的碳汇功能等这些方面的压力;面对恶化的生态环境(在上述压力之下,表现为水质恶化、雾霾加剧、垃圾围城、热岛效应凸显、噪声污染严重和水陆生态系统退化等)(郁亚娟等,2008),社会经济活动所采取源头控制和强度调整、以及末端的污染控制等调控手段和措施,低碳的经济发展模式而表现出逆向反馈,在未来一定程度和时期内缓解和改善生态环境状态,而这些方面皆属于低碳生态城市建设效应评估范畴.除此之外,由历

史或现状静态水平和未来动态演变趋势两者来共同决定低碳生态城市建设效应评估(Halpern *et al.*, 2012; 徐鹏等, 2013),其中未来动态演变趋势需要建立在城市 SLEE 系统动力学模拟基础之上,对社会、经济、能源和低碳生态子系统的规模、结构、布局和变化速率进行现有规划情景下的预测,再通过低碳生态城市建设效应评估模型计算其动态变化规律,最后对其指标潜力等进行调控,为制定城市未来低碳生态发展战略提供更具现实指导意义的思路.

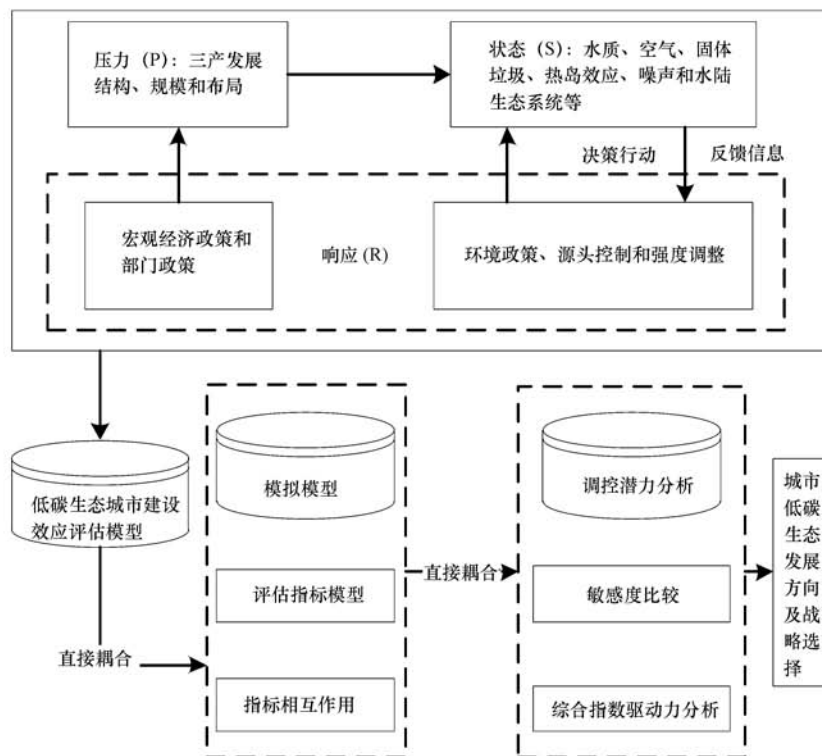


图1 低碳生态城市建设“PSR模型-系统仿真-调控”耦合模型结构

Fig.1 Structure of “PSR model-System simulation-Regulation” coupled model

2.3 模型结构

根据低碳生态城市建设效应的正向作用和逆向反馈以及现状静态水平和未来动态演变趋势相结合的认识框架,选择“压力”、“状态”和“响应”指标.从结构上看,一个完整的评估模型应包括指标和数据选取、评估标准、等级划分、指标权重和评估方法;而在系统仿真中,根据社会、经济、能源和环境等众多子系统之间的关系,把所选取的指标作为目标变量对未来进行预测;最后,根据各指标的敏感度计算调控潜力,进而为低碳生态城市建设提供发展方向及战略选择.

2.3.1 评估模型 低碳生态城市建设效应评估模

型用于评定基于低碳化手段和生态化理念的高关联、强交叉的复合型城市发展模式的城市发展水平.根据评价模型的不同,可分为加权算术平均法(赵国杰和郝文升,2011)、人工神经网络分析法(武静静等,2015)、因子分析法(关海玲和孙玉军,2012)、灰色关联分析法(付丽娜和贺灵,2013)、全排列多边形图示指标法(吴琼等,2005)和物元分析法(黄辉玲和吴次芳,2009).考虑到计算方法的简洁性、评价结果的直观性和利益相关者的可操作性,本研究选择加权算术平均法作为低碳生态城市建设效应评估模型.

(1) 指标和数据选取. 指标体系包含目标层(设

为低碳生态城市建设效应评估指数),方案层(压力、状态和响应)和指标层.其中,压力指标反映社会经济活动的规模、结构、速率和平均水平;状态指标反映特定时间内低碳生态城市建设的实际状况;响应指标则包括 SLEE 共同协调发展的各项措施以及各利益主体所采取的行动,具体备用指标参考文献(仇保兴, 2012; 陈晓晶等, 2013; 沈清基等, 2010; 黄云凤和崔胜辉, 2007).本研究根据指标的数据可得性、独立性、显著性和指示性原则,选择了 23 项指标(表 1).

本研究涉及的数据的主要来源包括:深圳统计

年鉴(2010—2014),深圳市国民经济和社会发展统计公报(2009—2014),深圳市环境状况公报(2010—2014),深圳市城市总体规划(2010—2020),深圳市低碳发展中长期规划(2011—2020年),深圳市人居环境保护与建设“十二五”规划,深圳市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要,深圳市经济体制改革“十二五”规划,深圳市海洋产业发展规划(2013—2020年),深圳市节能“十二五”规划,深圳市循环经济“十二五”规划等及其他调研资料和发表文献.

表 1 深圳市低碳生态城市建设效应评估优选指标,属性及标准

Table 1 Selected indicator, attribute and their criteria of comprehensive assessment for Shenzhen

方案层	指标名称	单位	属性	正/负向	最劣值	最优值
压力	人口密度	人·km ⁻²	社会	负向	5821 ^a	3500 ^b
	年末居民登记失业率		社会	负向	3.0% ^c	1.2% ^d
	人均 GDP	万元·人 ⁻¹	经济	正向	9.3 ^e	30.9 ^f
	人均海岸线长度	m·人 ⁻¹	生态	正向	0.0014 ^g	0.0289 ^f
	单位 GDP 能耗	t 标煤·万元 ⁻¹	低碳	负向	1.4 ^h	0.4 ^e
	单位 GDP 水耗	m ³ ·万元 ⁻¹	低碳	负向	21.9 ^f	5.2 ^e
	单位 GDP 二氧化碳排放量	t·万元 ⁻¹	低碳	负向	1434 ^f	860 ⁱ
状态	恩格尔系数		经济	负向	50.7% ^a	30.1% ^j
	森林覆盖率		生态	正向	40.0% ^k	57.3% ^l
	建成区绿化覆盖率		生态	正向	40.0% ^m	48.0% ⁿ
	城市热岛值	°C	生态	负向	0.97 ^f	0.81 ^e
	第三产业占 GDP 比重		经济	正向	40.0% ^k	61.2% ^f
	海洋产业产值占 GDP 比重		经济	正向	8.6% ^e	11.0% ^f
响应	研发投入占 GDP 比例		经济	正向	3.0% ^o	4.5% ⁿ
	城镇居民人均可支配收入	万元·人 ⁻¹	社会	正向	2.2 ^p	8.7 ^f
	城市污水集中处理率		生态	正向	80.2% ^e	100.0% ^f
	全市区域环境噪声平均值	dB	低碳	负向	56.9 ^f	50.0 ^q
	城市生活垃圾无害化处理率		生态	正向	94.3% ^e	100.0% ^f
	空气质量优良率		生态	正向	88.8% ^e	100.0% ^r
	公共交通占机动化出行比例		低碳	正向	47.0% ^e	65.0% ^f
	雨水利用率		低碳	正向	0.1% ^e	1.0% ^s
	万人在校大学生数	人·万人 ⁻¹	社会	正向	65 ^e	103 ^f
	万人拥有医生数	人·万人 ⁻¹	社会	正向	26 ^s	82 ^f

注:标准来源 a: 评估历史时间内全国最大值; b: 欧洲城市现状值; c: 深圳市规划值; d: 国际大城市就业最好年份失业率; e: 评估时间内深圳市最小值; f: 评估时间内深圳市最大值; g: 中国现状值; h: 来源于李润洁(2011); i: 中国规划值; j: 评估历史时间内全国最小值; k: 国家级生态县、生态市、生态省建设指标; l: 广东省现状值; m: 国家园林城市标准; n: 深圳市规划值; o: 发达国家现状值外推; p: 评估历史时间内全国平均值; q: 国家环保模范城市考核指标; r: 宜居城市标准; s: 全国现状值.部分指标解释:建成区绿化覆盖率:为城市建成区内一切用于绿化的乔、灌木和多年生草本植物的垂直投影面积与建成区总面积百分比;城市热岛值:热岛效应的表征参数,为城市内某区域的气温与郊区气象测点温度的差值;万人在校大学生数:指城市地区范围内每一万常住人口中拥有的在校大学生数,与城市发展呈正相关关系,其比例越高,代表社会的智能化水平越高,为低碳生态城市中的社会属性;万人拥有医生数:该指标用于反映城市的医疗卫生建设状况.

(2) 评估标准和等级划分. 评估标准是判别指标优劣的关键,其确定参照国内外规定的标准值、

公认的达标值、优秀的现状值及趋势外推和不可获取的重要指标用类似指标替代或专家咨询确定(李

润洁, 2011). 在本研究中, 对于大多数指标, 以评估时间范围内城市数据的最大或最小值作为最优或最劣值, 其对应标准值为 0 分或 100 分(取决于指标是正向或负向); 部分指标参考国家环保部《生态县、生态市、生态省建设指标》、国家环保模范城市考核指标等所规定的值, 国内外城市现状值、规划值及趋势外推等; 具体标准见表 1. 基于此, 本研究采用极差法把各项指标处理为 $[0, 1]$ 之间的数值, 从而消除指标量纲和性质不同对计算结果产生的影响, 使得所有指标都变为越大越优、无量纲和以 1 为基准, 具体过程参考徐鹏等(2013). 等级划分是低碳生态城市建设效应评估结果解译的基础. 为了匹配中国低碳生态城市指标体系构建及评估的需要(仇保兴, 2012), 本研究采用等分法对低碳生态城市建设效应评估指数的等级划分为“低”(0~20 分)、“较低”(20~40 分)、“中等”(40~60 分)、“较高”(60~80 分)、“高”(80~100 分).

(3) 低碳生态城市建设效应评估指数. 低碳生态城市建设效应评估指数(LCEI)计算公式为:

$$LCEI = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\omega_i \cdot \omega_j \cdot x_{ij}) \times 100 \quad (1)$$

其中, x_{ij} 为第 i 个方案层的第 j 个指标, ω_i 和 ω_j 分别为各方案层和各指标的权重. 权重反应评估的主观偏好, 确定方法包括: 等权法(陈守煜, 1990), 层次分析法(孙菲等, 2014; 钟永德等, 2014), 统计平均数法(徐鹏等, 2013) 和变权法(高伟等, 2014). 为了简单起见, 同时体现不同指标取值变化对评价结果的影响, 本研究权重通过变权法来确定, 计算方法为:

$$\omega_j = \frac{|Z_j - Z_{best}| + 1}{m + \sum_{j=1}^m |Z_j - Z_{best}|} \quad (2)$$

式中, ω_j 为指标 j 的权重, Z_j 为第 j 个指标的标准化值, Z_{best} 表示评价标准的最优值(在本研究中为 1); m 为评价指标的总数量.

2.3.2 模拟模型 (1) 城市 SLEE 系统动力学模型. 低碳生态城市物质流和能流系统涉及社会、经济、能源和环境等众多子系统, 各子系统之间存在密切的相互作用, 输入、输出的物质和能源包括化石燃料、金属和工业矿物及建筑材料, 水电及其他新兴能源, “三产”的生物产量, 水, 二氧化碳和污染物(大气、水和固体废弃物, 耗散性物质等)等, 各变量又随时间的变化而变化(刘伟等, 2014). SD 的基

本结构是系统的因果反馈结构, 通过系统内部各变量之间的反馈约束(正反馈和负反馈), 从而模拟整个系统的行为变化与动态响应关系(王其藩, 1995). 基于 SD 思想, 在研究低碳生态城市物质流和能流系统时, 环境子系统主要决定海陆域生态系统碳汇能力; 社会子系统中人口总量、城镇化率和低碳消费意识将直接影响着环境子系统; 经济子系统决定着城市的经济发展水平、产业结构、产业能源消耗结构和低碳技术水平, 进而对能源子系统产生影响; 能源子系统能源消耗总量取决于人口总量, GDP 增长, 产业能源消耗结构和产业结构, 进而整个海陆域生态系统的碳平衡主要取决于能源消耗增长, 最终影响环境子系统(范太胜, 2013). 本研究以 Vensim[®] DSS 软件作为建立模型和模拟仿真的平台, 根据低碳生态城市物质流和能流系统的内部机制分析, 可以绘制出其因果关系流程图(图 2).

(2) 模型边界. 模型边界为深圳市, 涉及 6 个市辖区和 4 个功能区. 系统模拟的时间边界为 2013—2020 年, 以 2013 年为基准年, 模拟时间间隔为 1 年.

(3) 系统及变量设置. 本研究从“压力-状态-响应”角度建立了社会、经济、能源和环境子系统的发展规模、结构、布局、碳排放量、碳汇和生态环境的响应模块, 指标的低碳和生态属性分别属于能源和环境子系统. SD 模型主要变量有 4 种: 状态变量、速率变量、辅助变量和常数变量. 深圳市低碳生态城市建设效应评估 SD 模型包括 69 个变量, 其中状态变量 17 个, 常数 9 和辅助变量 43 个(图 3). 这些变量的赋值基本方法有统计学方法、规划设定法和模型校正法(秦耀辰等, 1997). 由于不同变量的性质不同, 对不同变量采用的统计方法应有所区别. 本研究根据变量自身性质和模型运行要求, 综合运用了 3 种方法, 确定深圳市 SLEE 建设效应评估系统的待参数.

(4) 模型检验及指标调控. 目前广泛采用的 SD 模型有效性检验方法有直观检验、历史检验以及灵敏度分析(陶冶和薛惠锋, 2009). 相比于一般统计模型和物理模型, SD 的主要功能在于正确判别行为趋势和关注模型的结构及其行为是否合理, 而不是为了重现历史数据或者追求数据的精确性(钟永光等, 2009). 其中, 参数灵敏度分析是研究在合理范围内变化, 模型行为对参数值变化的灵敏度, 以检查某些参数的微小变动是否会对模型行为产生大

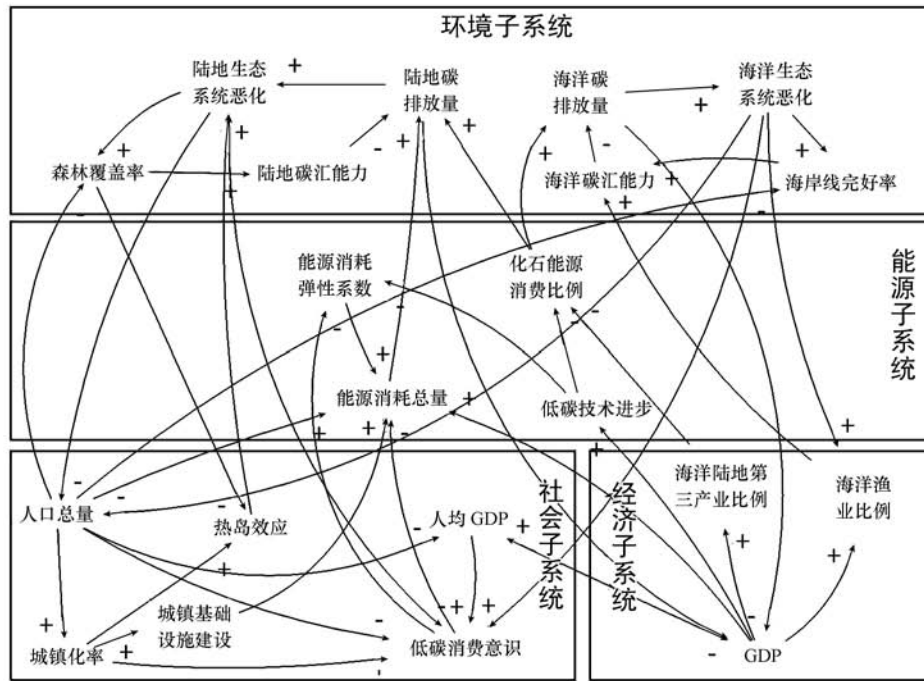


图 2 低碳生态城市物质流和能流系统因果关系

Fig.2 Casual loops of material and energy flow system in low-carbon eco-city

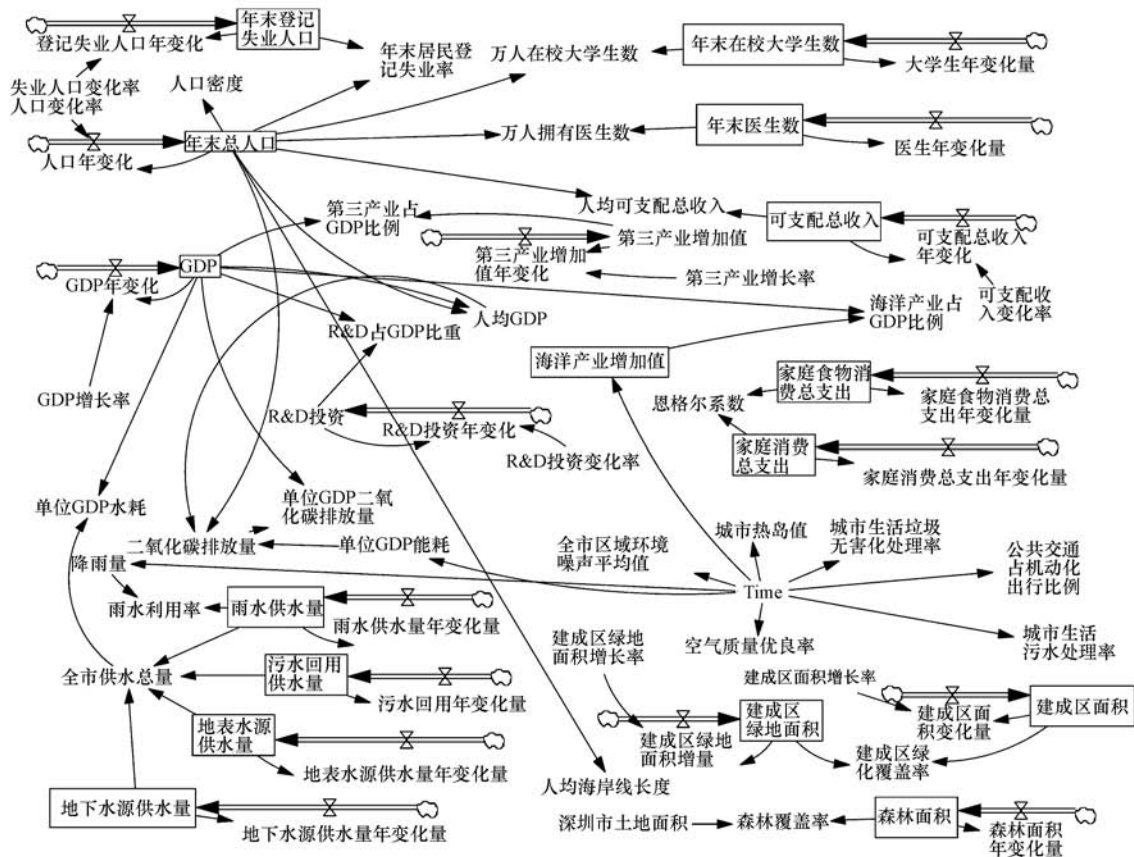


图 3 深圳市 SLEE 耦合 SD 系统

Fig.3 Systematic dynamic model of Shenzhen socio-economic-low-carbon technology-ecological environment coupled system

的影响和测试系统结构是否稳定.本研究中为了识别各项调控指标变化对方案层和目标层的影响,计算了指标变化幅度 10% 时(规模指标为现状值的 10%,结构类指标为实际变动幅度),压力、状态、响应和综合指数的变化幅度.

2.3.3 调控潜力分析 基于建立的深圳市 SLEE 系统动力学模拟模型,可以测试不同指标对评估体系中方案层和目标层的影响,通过获取敏感度进而识别各层对于未来深圳市低碳生态建设调控的影响和潜力.本研究中调控的指标共 11 项(图 7),根据各指标的可能变动范围,单位 GDP 能耗和公共交通占机动化出行比例来自于深圳市低碳发展中长期规划(2011—2020 年),海洋产值来自于纪岩青和袁振江(2013),其余指标选取 2020 年数据,从而计算出各自相应的调控潜力,即某项指标调控对深圳市的综合影响最大改善能力或可能的压力(后希康等, 2014),计算公式如下:

$$Po_i = Se_i \cdot \Delta Ra_i \quad (3)$$

式中, Po_i 为指标 i 的调控效果潜力, Se_i 为指标敏感度,即单位指标数值变化对调控目标的影响; ΔRa_i 为指标的可能变化幅度.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 评估结果分析

3.1.1 低碳生态城市建设效应评估指数 按照上述指标体系和计算方法,得到深圳市 LCEI(图 4).结果表明:2009—2013 年深圳市 LCEI 整体呈现上升趋势,2009—2010 年上升缓慢,然而,之后从 2010 年的 30.9 提升到 2013 年的 44.0,其评估等级从“IV 级:较低”提升 1 个等级,达到“III 级:中等”,此上升趋势和增长速率主要是由于在 2010 年,深圳市与国家住房和城乡建设部签署共建国家低碳生态示范市合作框架协议,合作建设全国第一个“低碳生态示范市”,期望在低碳生态城市建设、低碳生态技术应用研发等方面积极探索,大力推进绿色交通、绿色建筑,促进深圳的城市发展转型和可持续发展,为全国的低碳生态城市建设发挥示范作用(Flynn *et al.*, 2011).此外,从 LCEI 的未来动态演变趋势(现有发展速度和调控力度不变情景)来看,2015 和 2020 年分别上升到 49.5 和 61.7,尽管保持增长趋势且达到“II 级:较高”水平,但呈现增长缓慢甚至“饱和”状态.因此,依旧有必要优化调控深圳市低碳生态城市建设中社会经济发展和模式,进一步

落实和强化深圳市低碳生态产业结构调整 and “海洋强市”等措施.

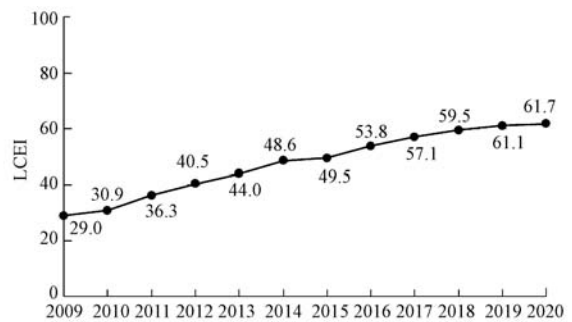


图 4 深圳市低碳生态城市建设效应评估指数历史和未来演变
Fig.4 Past and future trend of LCEI on the effects of low-carbon eco-city development in Shenzhen

3.1.2 方案层评估结果分析 为了进一步理解深圳市 LCEI 历史和未来水平,将从方案层的压力、状态和响应来分析.历史和未来评估结果表明,“压力层”和“响应层”整体上呈现上升趋势,只有“状态层”出现波动但基本保持稳定.社会经济发展“压力”在 2009 年(28.6)至 2010 年(27.8)出现下降,之后呈现持续改善的趋势,从 2011 年的 38.6 上升到 2015 年的 51.5(图 5),对 LCEI 水平的相对贡献处于正面影响,在 2015 年之后,虽然压力层指数增大,但对 LCEI 水平的相对贡献处于负面影响;相比之下,深圳市低碳生态城市建设“状态”在 2011 年(38.3)和 2015 年(42.9)出现下降趋势,但是前者对 LCEI 水平的相对贡献处于正面影响,而后者则相反;其调控“响应”从 2009 年(17.1)开始一直处于上升状态,到 2030 年(76.1)大到“II 级:较高”水平,

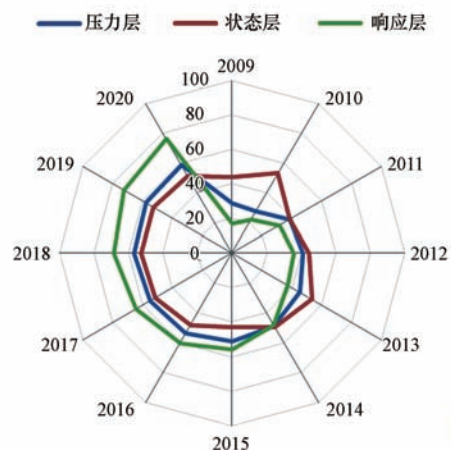


图 5 深圳市方案层指数 2009—2020 年演变趋势及贡献水平
Fig.5 Past and future trend of index of criteria level and its contribution for goal level

在 2015 年“响应”层开始超过“目标”层,对 LCEI 水平开始呈现正面贡献,这主要得益于深圳市“十二五”发展规划把“基本建成全国经济中心城市、国家创新型城市、民生幸福城市、国家低碳生态示范城市”作为社会经济发展的总体发展目标,加快向中国特色社会主义示范市和现代国际化先进城市迈进,且截止到 2013 年底,其“十二五”《规划纲要》提出的 32 项调控指标已经有超过 3 成指标提前完成.此外,从未来动态演变趋势来看,3 个方案层相对于 2013 年,2020 年的压力层和响应层分别上升了 22.7%和 51.2%,状态层下降了 3.7%(图 5).

3.1.3 指标层评估结果分析 事实上,各个指标对方案层的贡献存在明显差别(图 6).对于社会经济发展“压力”而言,2009—2013 年其主要制约因素是人口密度(4899 ±423 人·km⁻²)和人均海岸线长度(0.027±0.002 m·人⁻¹),前者与全国 2009—2013 年平均水平(142 人·km⁻²)相差较大,后者由于深圳市常住人口的增加出现逐年下降的趋势;相比而言,支撑“压力”层能缓慢上升的原因是深圳市人均 GDP 的快速提高,从 2009 年的 9.3 提高到 2013 年的 13.7 万元·人⁻¹,高于北京市(8.4 万元·人⁻¹)和上海市(7.0 万元·人⁻¹)等发达城市 2009—2013 年平均水平;单位 GDP 能耗、水耗和二氧化碳排放量等指标,继续处于全国领先水平,提前完成深圳市“十

二五”规划目标.对于深圳市低碳生态城市建设“状态”而言,得益于森林覆盖率和第三产业占 GDP 比例,2013 年相比于 2009 年分别上升了 4.3%和 5.9%,前者增加了陆域的碳汇能力和改善生态环境,后者进行产业结构的调整,减少二氧化碳的排放量;考虑到海洋资源的利用以及碳汇功能,本研究也选取了海洋产值占 GDP 比例指标,在 2009—2012 年,深圳市海洋交通运输业、海洋油气业、滨海旅游业三大优势产业增加值合计均占当年全市海洋生产总值 95%以上,2013 年相比于 2009 年也上升了 2.6%.对于深圳市低碳生态城市建设调控“响应”而言,主要得益于研发投入占 GDP 比重和城市生活污水处理率(二级处理),其中,研发投入占 GDP 比重从 2009 年的 3.4%上升到 2013 年的 3.8%,远高于广东省(2.1%)和全国平均水平(1.9%);其次,城市生活污水处理率(二级处理)持续上升,从 2009 年 80.2%提高到 2013 年的 98%,已经远超过全国水平(80.9%);然而,公共事业(万人在校大学生数和万人拥有医生数)以及雨水利用率还有较大控制或利用空间.从未来的预测来看,2014—2020 年间,深圳市社会经济发展“压力”的限制指标依然是人口密度和人均海岸线长度,其正面贡献趋向于最劣值,当然人均 GDP、单位 GDP 能耗、水耗和二氧化碳排

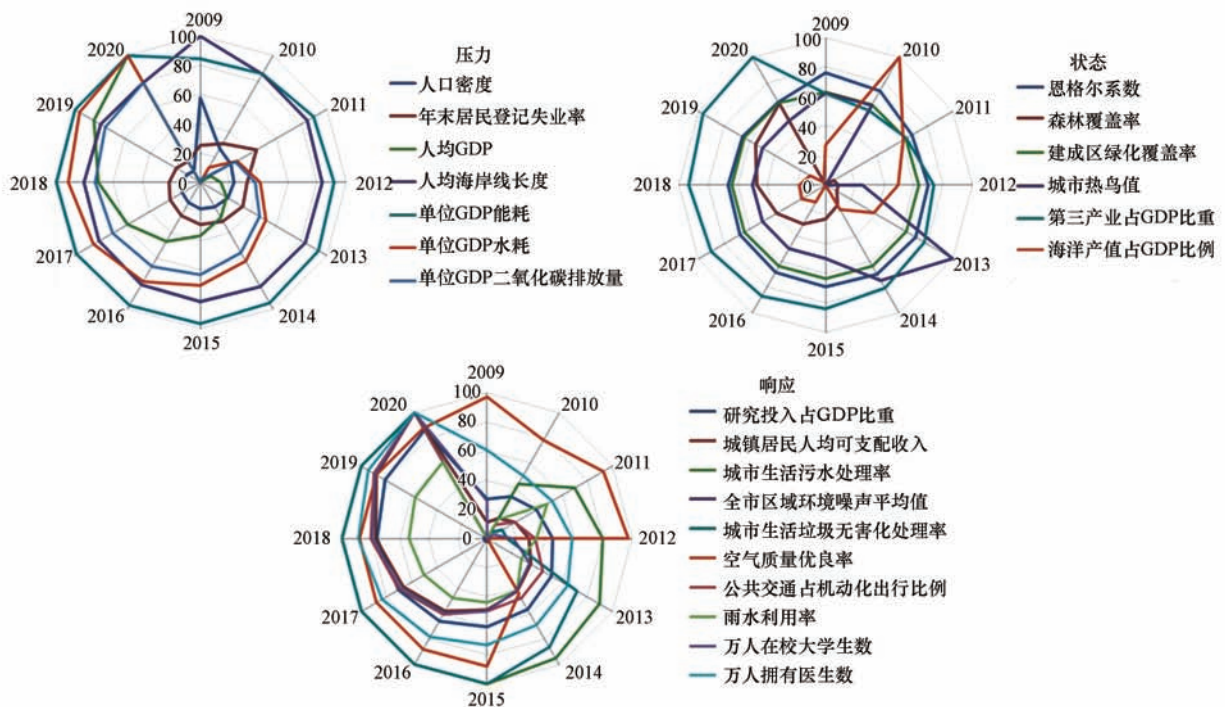


图 6 深圳市“压力-状态-响应”各指标历史及未来对方案层的贡献水平
Fig.6 Past and future trend of standardized indicators and its contribution for criteria level

放量及其贡献皆逐年上升,缓解了压力层下降速度(图6)。深圳市低碳生态城市建设“状态”中的各项指标对状态层的贡献,除森林覆盖率和第三产业占GDP比例上升外,其余一直保持不变或者下降,海洋产值占GDP比例下降幅度较大。在“响应”中,城市生活污水处理率和城市生活垃圾无害化处理率已经达到100%,没有提升的空间,而如果对全市区域环境噪声平均值的控制加强,则会对增加响应层的增长速度。

3.2 深圳市 SLEE 系统调控潜力

根据上述模型检验和指标调控方法计算结果如下:各层变化幅度如图7所示,从各项调控指标看,森林面积、海洋产值、研发投入和公共交通占机动车出行比例等呈现正效应,人口数量、单位GDP能耗和家庭食物消费总支出等呈现负效应,GDP呈现出正负效应,这些指标是重要的敏感指标,对各层的敏感度较高。

在计算深圳市 SLEE 系统调控潜力时,首先确定选中的11项指标的取值上限(正向指标)或下限(负向指标),其中,人口数量、森林面积、第三产业增加值、研发投入、在校大学生数、雨水利用量、GDP和家庭食物消费总支出的取值主要依据历史变化趋势和现状发展水平确定,单位GDP能耗、海洋产值和公共交通占机动化出行比例的变化极限主要参考当地规划。结果表明:不同指标对LCEI的提升潜力差异很大,提升能力范围为-10.5~19.6,其中海洋产值能够使LCEI提高19.6,而GDP使其降低10.5。综合各项指标的整体潜力,到2020年LCEI可提升18.6。因此,在适当的社会经济与环境政策的驱动和影响下,深圳市未来的LCEI仍有提升的空间。

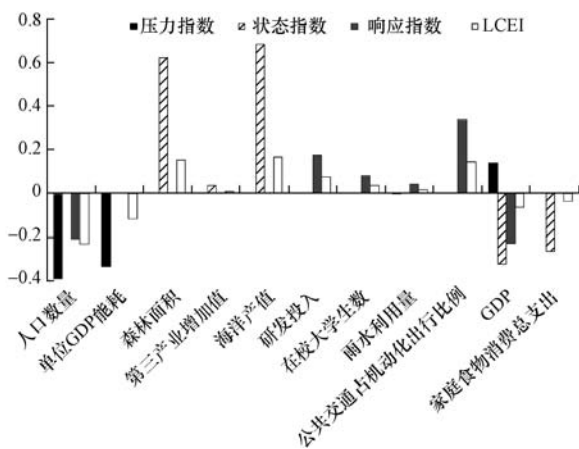


图7 重要评估指标对各层的敏感度

Fig.7 Sensitivity of assessment index to key standardized indicators

4 结论(Conclusions)

深圳市 LCEI 过去 5 年整体呈现上升趋势,2009—2010 年上升缓慢,然而,之后从 2010 年的 30.9 提升到 2013 年的 44.0,其评估等级从“IV 级:较低”提升 1 个等级,达到“III 级:中等”,此上升趋势和增长速率不仅印证了深圳市开展低碳生态城市建设的效果,也为全国的低碳生态城市建设发挥示范作用;在现有发展速度和调控力度不变情景下,2015 和 2020 年分别上升到 49.5 和 61.7,尽管保持增长趋势且达到“II 级:较高”水平,但呈现增长缓慢甚至“饱和”状态。

社会经济发展“压力”在 2009 年至 2010 年出现下降,之后呈现持续改善的趋势,其主要制约因素是人口密度和人均海岸线长度,支撑“压力”层能缓慢上升的原因是人均 GDP 的快速提高以及单位 GDP 能耗、水耗和二氧化碳排放量的显著降低。低碳生态城市建设“状态”虽然出现 2 次“跳跃式”下降,但整体趋于稳定且有上升趋势,主要得益于森林覆盖率和第三产业占 GDP 比例的增加;选取海洋产值占 GDP 比例作为评价指标主要是考虑海洋资源的利用及碳汇功能,在 2009—2012 年,深圳市海洋交通运输业、海洋油气业、滨海旅游业三大优势产业增加值合计均占当年全市海洋生产总值 95% 以上,2013 年相比于 2009 年也上升了 2.6%。低碳生态城市建设调控“响应”一直处于上升趋势,主要表现是研发投入占 GDP 比重和城市生活污水处理率(二级处理)的提高;然而,公共事业(万人在校大学生数和万人拥有医生数)以及雨水利用率还有较大控制或利用空间。因此,站在历史和未来演变趋势来看,依旧有必要优化调控深圳市低碳生态城市建设中社会经济发展的方向和模式,使之适应自然资源短板的现实,整合自然资本存量,构建自然资源安全体系;发挥海域碳汇的优势,结合陆域碳汇的能力建设,构建“绿碳-蓝碳”统筹的碳汇经济,建设“海陆一体化”的低碳生态城市,助推海丝之路的战略目标;大力发展绿色交通和创新绿色市政规划建设;进一步落实和强化深圳市低碳生态产业结构调整 and “海洋强市”等措施。

本研究基于综合评估模型、系统动力学仿真模型和调控潜力分析,构建一种低碳生态城市建设效应评估模型,从系统学的角度解决了城市模拟模型的复杂性、非线性和动态性等特点带来的难题,完

善了系统模拟与评估耦合的理论与方法.该模型在深圳市的例证研究表明此模型能够有效的获得优于常规模拟方法的城市 SLEE 协调发展的方向,规模和布局,提供了决策上的支持和依据,也为其他城市的相关研究提供了借鉴.事实上,本研究在模型构建、参数选取以及指标调控等方面都仍有待进一步完善,由于各城市的社会经济发展、自然资源、产业结构和污染治理水平等因素的差异,从而面临的环境问题和城市管理措施也不尽相同,故此方法需要在广泛应用中逐步检验、修正和完善.

责任作者简介: 栾胜基 (1951—),男,教授,博士生导师,从事环境规划与管理研究,主要研究方向为中国农村环境问题、环境质量评价等.

参考文献 (References):

- Angel S, Steppard S C, Civco D L, *et al.* 2005. The dynamics of global urban expansion [R]. Washington, DC: Department of Transport and Urban Development, The World Bank
- Bunning J. 2014. Governance for regenerative and decarbonised eco-city regions[J]. *Renewable Energy*, 67: 73-79
- Cao S, Li C. 2011. The exploration of concepts and methods for Low-Carbon Eco-City Planning[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 5: 199-207
- de Jong M, Wang D, Yu C. 2013. Exploring the relevance of the eco-city concept in China: the case of Shenzhen Sino-Dutch low carbon city [J]. *Journal of Urban Technology*, 20(1): 95-113
- Flynn A, Franklin A, Hopf C, 等. 2011. 深圳低碳生态城国外经验借鉴研究报告[R]. 深圳: 英国卡迪夫大学可持续空间研究所, 中国城市科学研究会学术交流部
- Halpern B S, Longo C, Hardy D, *et al.* 2012. An index to assess the health and benefits of the global ocean [J]. *Nature*, 488(7413): 615-620
- Li Y F, Li Y, Zhang H, *et al.* 2011. Canadian experience in low carbon eco-city development and the implications for China [J]. *Energy Procedia*, 5: 1791-1795
- Liu H L, Zhou G H, Wennersten R, *et al.* 2014. Analysis of sustainable urban development approaches in China[J]. *Habitat International*, 41: 24-32
- Wu K L, Shan L, Li X, *et al.* 2014. Developing a low-carbon ecological city planning model from the viewpoint of eco-region: case study of Shenzhen//Xu Q J, Li H, Li Q X. *Advanced Materials Research* [M]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 218-225
- Yu L. 2014. Low carbon eco-city: new approach for Chinese urbanisation [J]. *Habitat International*, 44: 102-110
- Zhou N, He G, Williams C, *et al.* 2015. ELITE cities: a low-carbon eco-city evaluation tool for China[J]. *Ecological Indicators*, 48: 448-456
- 陈守煜. 1990. 模糊水文学与水资源系统模糊优化原理[M]. 大连: 大连理工大学出版社
- 陈晓, 叶伟华. 2011. 深圳低碳生态城市规划编制和实施管理探索和实践[J]. *重庆建筑*, 10(8): 1-4
- 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*, 29(1): 15-19
- 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
- 丁冬梅. 2012. 城市化进程中低碳生态城市建设路径研究[J]. *商业时代*, (27): 129-130
- 范太胜. 2013. 基于系统动力学的低碳经济发展模式研究: 以福建省为例[J]. *华东经济管理*, 27(8): 12-16
- 樊行, 陆佳, 王吉勇. 2012. 低碳生态理念下城市规划的实践与转变——以深圳为例[J]. *低碳世界*, (7): 56-59
- 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
- 高伟, 陈岩, 郭怀成. 2014. 基于“评价-模拟-优化”的流域环境经济决策模型研究[J]. *环境科学学报*, 34(1): 250-258
- 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
- 郝文升, 温娟, 李燃, 等. 2014. 基于GM(1, 1)模型的低碳生态城市可达性分析模型构建及应用[J]. *城市环境与城市生态*, 27(5): 27-31
- 郝文升, 赵国杰, 温娟, 等. 2012. 低碳生态城市的区域协调发展研究——以中新天津生态城为例[J]. *城市发展研究*, 19(4): 28-33
- 后希康, 高伟, 徐鹏, 等. 2014. 流域社会经济发展对山东省东平湖水环境影响评估及优化调控[J]. *湖泊科学*, 26(2): 313-321
- 黄辉玲, 吴次芳. 2009. 基于可拓学的生态市建设评价——以哈尔滨市为例[J]. *地理科学*, 29(5): 651-657
- 黄云凤, 崔胜辉. 2007. 沿海生态城市的海洋指标体系研究——以厦门市为例[J]. *台湾海峡*, 26(4): 508-515
- 纪岩青, 袁振江. 2013. 2020年深圳将建成现代海洋产业群[Z]. 中国海洋新闻网. 1
- 李润洁. 2011. 长沙低碳生态城市建设评价体系研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学. 67
- 李迅. 2012. 构建低碳生态城市的实践与探索[J]. *低碳世界*, (6): 56-60
- 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
- 刘伟, 陈超凡, 桓汉青, 等. 2014. 基于系统动力学模型的低碳城市发展研究[J]. *环境污染与防治*, 36(4): 86-91
- 秦耀辰, 赵秉栋, 张俊军, 等. 1997. 河南省持续发展系统动力学模拟与调控[J]. *系统工程理论与实践*, 17(7): 126-133
- 沈清基, 安超, 刘昌寿. 2010. 低碳生态城市的内涵、特征及规划建设的基本原理探讨[J]. *城市规划学刊*, (5): 48-57
- 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; 158
- 孙菲, 罗杰. 2011. 低碳生态城市评价指标体系的设计与评价[J]. *辽宁工程技术大学学报(社会科学版)*, 13(3): 258-261
- 唐建青, 刘金锤, 李姗姗. 2013. 郑州市低碳生态城市评价与发展保障机制研究[J]. *科技创新导报*, (12): 134-138
- 陶冶, 薛惠锋. 2009. 基于投资的可持续能源税收政策决策模型[J].

- 计算机仿真, 26(4): 312-316
- 王吉勇, 陆佳, 胡盈盈, 等. 2012. 低碳生态规划的作用机制探讨——以深圳为例[C]. 2012 中国城市规划年会. 昆明: 1-12
- 王其藩. 1995. 高级系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社
- 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
- 吴琼, 王如松, 李宏卿, 等. 2005. 生态城市指标体系与评价方法[J]. 生态学报, 25(8): 2090-2095
- 徐鹏, 高伟, 周丰, 等. 2013. 流域社会经济的水环境效应评估新方法及在南四湖的应用[J]. 环境科学学报, 33(8): 2285-2295
- 杨晓春, 廖晓卉, 单浩, 等. 2010. 大都市的低碳生态规划之路——以深圳为例[A]. //第十二届中国科协年会论文集[C]. 福州: 中国科协. 1-7
- 姚元和. 2013. 渝东南翼低碳生态城市建设研究[J]. 长江师范学院学报, 29(4): 16-20
- 郁亚娟, 郭怀成, 刘永, 等. 2008. 城市病诊断与城市生态系统健康评价[J]. 生态学报, 28(4): 1736-1747
- 张东升, 丁爱芳, 朱旻. 2013. 基于指标测度的低碳生态城市规划研究[A]. //2013 中国城市规划年会论文集[C]. 青岛: 中国城市规划学会. 1-7
- 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
- 钟永德, 石晟屹, 罗芬, 等. 2014. 杭州低碳生态城市评价体系设计及实证研究[J]. 中南林业科技大学学报, 34(6): 117-123
- 钟永光, 贾晓菁, 李旭, 等. 2009. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社
- 朱洪祥, 雷刚, 吴先华, 等. 2012. 多维视角下低碳生态城市指标体系构建——以东营市为例[J]. 现代城市研究, (12): 87-93