

基于生态效率的城市可持续性评价及应用研究

王微^{1,2}, 林剑艺^{1*}, 崔胜辉¹, 曹斌^{1,2}, 石龙宇^{1,2}

(1. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:综合评价城市复合生态系统是实现区域可持续发展要面对的重要科学问题. 城市生态效率反映了城市系统的资源环境与社会福利的投入产出关系, 是将可持续发展的宏观目标融入城市发展规划与管理中的有效工具. 综合生态足迹和人类发展指数的理论方法, 构建了基于生态效率的城市可持续性评价模型. 应用该模型对厦门市生态效率进行了时间序列分析: 2000~2006年, 厦门市生态效率呈现先平稳上升后陡然下降又小幅回升的波动性变化. 厦门市人均生态足迹由 4.279 hm² 增加至 5.462 hm²; 人类发展指数由 0.831 增加至 0.896; 生态效率下降 15.5%, 资源效率下降 15.7%, 环境效率下降 15.3%. 研究表明, 厦门市的可持续性经历了由可持续性次增强→可持续性增强→可持续性减弱→可持续性增强路径的转变, 总体趋势仍是可持续性减弱.

关键词: 城市; 生态效率; 可持续性; 人类发展指数; 生态足迹

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)04-1108-06

Urban Sustainability Assessment Based on Eco-efficiency and Its Application

WANG Wei^{1,2}, LIN Jian-yi¹, CUI Sheng-hui¹, CAO Bin^{1,2}, SHI Long-yu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Comprehensive assessment on urban ecological system is one of important issues for regional sustainable development research. Urban eco-efficiency is the effective tool to integrate sustainable strategies into the development planning and management initiatives, which expresses the relationship of inputs of ecological impact and outputs of social welfare. An evaluation model of urban sustainability based on eco-efficiency was proposed by integrating Ecological Footprint model and Human Development Index. Using this model, a case study of Xiamen City was carried out using the statistical data from 2000 to 2006. There is a fluctuation of eco-efficiency which showed a steady increase first, then a sharp decline and a marginal increase towards the end. During 2000-2006, the per-capita ecological footprint increases from 4.279 hm² to 5.462 hm²; and the Human Development Index increases from 0.831 to 0.896; thus the eco-efficiency, resource efficiency and environmental efficiency declines by 15.5%, 15.7% and 15.3% respectively. Xiamen experiences sustainability hypo-increasing phase first, sustainability increasing phase secondly, then sustainability decreasing phase, and sustainability increasing phase in the end. On the whole, the urban sustainability shows a decreasing trend.

Key words: city; eco-efficiency; sustainability; human development index (HDI); ecological footprint

据联合国估计, 2007年底地球上已有超过一半的人口聚集在城市区域内^[1]. 城市的可持续发展是实现人类可持续发展目标的重心和焦点, 其可持续性的评价一直是各国学者关注的热点问题^[2,3]. 国内外学者从不同角度对城市可持续性评价进行了广泛而深入的探索, 主要有两类方法: 一类是可持续发展评价指数法, 一类是可持续发展评价指标体系法. 可持续发展评价指数一般^[4-6]采用生态足迹模型、可持续发展经济福利指数、人类发展指数等来评估城市发展的可持续性. 这些方法多侧重于城市可持续性评价的某一方面, 如生态足迹模型侧重于自然资本利用方面, 人类发展指数侧重于社会经济发展方面. 然而对于城市复合生态系统, 单独使用以上任何一种方法来评价城市的可持续性都未能全面反映该系统的综合性和协调性. 可持续发展评价指标体系一般通过将错综复杂的系统信息简单化和定量化

以构建综合指标体系来评价城市发展的可持续性^[7,8]. 与上述单目标评价方法相比, 指标体系法可以综合反映自然、经济、社会各子系统的发展水平和协调程度, 但也存在指标庞杂且不平衡、指标权重确定具有较大主观性、指标难以量化导致操作性差等缺陷. 可见目前关于城市可持续性的评价方法各有优缺点, 仍需进一步改进和完善.

本文基于生态效率概念, 综合应用生态足迹模型和人类发展指数方法, 构建新的城市可持续性评价的度量模型. 该方法内在涵盖了城市生态系统的社会、经济、资源和环境等方面, 克服了传统可持续

收稿日期: 2009-07-09; 修订日期: 2009-11-12
基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-450); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目; 厦门市科技计划项目 (3502Z20072002)
作者简介: 王微 (1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境经济与可持续发展. E-mail: cwang@iue.ac.cn
* 通讯联系人, E-mail: jylin@iue.ac.cn

发展评价指数偏重评价某一方面以及传统评价指标体系过于繁杂、不易比较的缺陷,以探索可持续性评价的新方法、新思路。

1 城市可持续性评价理论与方法

1.1 生态效率概念

最有代表性的生态效率定义是世界经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)在借鉴反映经济和环境关系的“控制方程”的基础上提出的生态效率概念模型^[9,10]:

$$E = S/I \quad (1)$$

式中, E 为生态效率, S 为社会服务量, I 为生态负荷。社会服务量可用人口数、年产值(如GDP)和年工业增加值等表示;生态负荷反映资源利用水平和污染物排放情况。如果社会服务量的增长大于同期内生态负荷的增长,那么生态效率就会提高。反之,生态效率降低。生态负荷包括资源负荷和环境负荷,相应的生态效率可分为资源效率 R 和环境效率 P ,即资源效率为社会服务量与资源负荷的比值,环境效率为社会服务量与环境负荷的比值^[11]。

城市这一特殊复杂系统具有开放性,与外界存在着物质、能量和信息等方面的交换。城市发展需要不断地从其他地方摄入大量的物质、能量,同时为居民提供各种服务并释放各种废物^[12]。对于城市可持续性研究,笔者最关注的是福利产出与城市生态负荷的关系,因此本文定义城市生态效率为:

$$CE = W/I = w/i \quad (2)$$

式中, CE 为城市生态效率, W 为城市福利产出, I 为城市生态负荷, w 为人均福利产出, i 为人均生态负荷。相应地,城市资源效率和城市环境效率即为福利产出与资源负荷和环境负荷的比值。

1.2 基于生态效率的城市可持续性评价模型

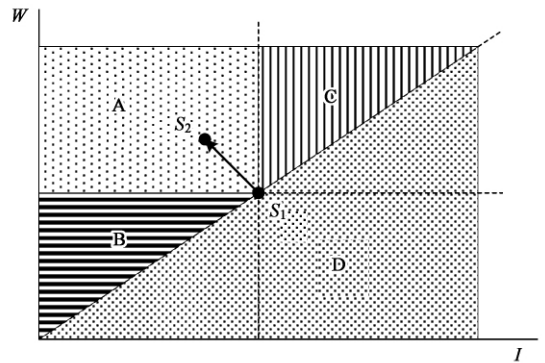
关于可持续城市的概念和内涵,很多国内外专家学者开展了广泛深入的探讨^[13-16]。其中比较具有代表性的是Urban 21 Conference提出的概念,其认为可持续城市是指改善城市生活质量,包括生态、文化、政治、机制、社会和经济等方面,而不给后代遗留负担的城市发展模式^[13]。赵景柱等^[14]认为可持续城市是具有保持和改善城市生态系统服务能力,并能够为其居民提供可持续福利的城市。从现有研究来看,可持续城市的基本内涵是在保证城市居民福利(包括经济福利和社会福利)的前提下,使自然资源的消费和环境污染最小化,使社会、经济、环境与

资源协调发展,物质、能量与信息得到高效利用。

城市生态效率即城市人均福利与人均资源环境消耗的比值,衡量了城市在社会经济发展中利用自然资源的始端输入与终端输出的比例关系。因此从这个意义上讲,城市的可持续性可以用生态效率来度量。如果社会福利的增长大于同期生态负荷的增长,城市的生态效率就会提高,城市的可持续性也随之增强;反之,如果社会福利的增长小于同期生态负荷的增长,那么城市的生态效率就会降低,城市的可持续性也随之减弱。因此,本文以城市生态效率为主要度量标准来判断城市可持续性的增减,如式(3)所示。

$$\begin{cases} CE(t) < CE(t + \Delta t) & \text{可持续性增强} \\ CE(t) > CE(t + \Delta t) & \text{可持续性减弱} \end{cases} \quad (3)$$

在城市生态效率定义基础上,为进一步区分生态效率提高的不同情况,需要构建可持续性评价度量模型。在图1中,纵轴为福利 W ,横轴为生态负荷 I ,图中任意一点的生态效率即为该点与原点连线的斜率。 S_1 代表 t 时刻的发展状态, S_2 为 $(t + \Delta t)$ 时刻的发展状态,根据 S_2 相对 S_1 所处的不同位置来判



A 区域:可持续性增强区域

$$CE(t) < CE(t + \Delta t)$$

$$W(t) < W(t + \Delta t)$$

$$I(t) > I(t + \Delta t)$$

B 区域:可持续性次增强区域

$$CE(t) < CE(t + \Delta t)$$

$$W(t) > W(t + \Delta t)$$

$$I(t) > I(t + \Delta t)$$

C 区域:可持续性次增强区域

$$CE(t) < CE(t + \Delta t)$$

$$W(t) < W(t + \Delta t)$$

$$I(t) < I(t + \Delta t)$$

D 区域:可持续性减弱区域

$$CE(t) > CE(t + \Delta t)$$

图1 城市可持续性评价模型

断发展方向.图 1 概念性表征了 3 种可持续性区域和 4 种城市发展路径. A 区域为可持续性增强区域,表征兼顾社会发展和资源环境保护的可持续发展路径,即城市生态效率提高,同时社会福利增加且资源环境负荷减少;B、C 区域为可持续性次增强区域,其中 B 区域表征牺牲社会福利发展而保护资源环境的发展路径,即城市生态效率提高,但社会福利和资源环境负荷同时减少;C 区域表征社会福利发展同时增加资源环境负荷的发展路径,即城市生态效率提高,社会福利和资源环境负荷同时增加,但资源环境负荷增加在可控范围内;D 区域为可持续性减弱区域,表征资源环境消耗快于社会福利水平提高的发展路径,即城市生态效率不断降低.

1.3 城市生态效率度量方法

1.3.1 福利的测度

目前国际上较为通用的评价国家或地区的福利水平指标是联合国开发计划署(United Nations Development Program, UNDP)的人类发展指数(human development index, HDI)^[17, 18]. HDI 是由某一国家或地区人类发展的 3 个基本分项指数的算术平均值计算得到的一项综合指数. 3 个分项指数包括:①预期寿命水平,反映居民健康长寿的生活水平,以人口出生时的预期寿命来衡量;②居民受教育水平,以成人识字率(占 2/3 权重)和初中高等教育的综合毛入学率(占 1/3 权重)来测度;③居民体面的生活水平,用购买力平价法(purchasing power

parity, PPP)计算的美元人均 GDP 指数来表示^[19]. HDI 概括了人类发展最基本的目标,反映了人类发展最重要的维度,即预期寿命、教育程度和经济发展水平,因此以 HDI 作为初步衡量国家和地区的福利水平指标是较为科学而合理的.

1.3.2 资源环境负荷的测度

生态足迹分析方法因其直观、综合、可操作性强,为核算地区的自然资本利用提供了一个简明的框架.在 Wackernagel 提出的生态足迹模型中,账户的选择主要关注生物和能源产品的消费及温室气体 CO₂ 的消纳,并没有把自然系统提供资源、消纳废弃物的功能描述完全,忽视了水资源以及其他环境污染的估算.为此,本文在借鉴相关研究的基础上^[20-22],补充构建了涵盖水资源帐户和环境污染帐户的生态足迹计算模型(表 1),以便使生态足迹结果更加全面客观地测度城市资源环境负荷状况.在污染物项目选取时遵循以下原则:①所选取的污染物项目应为主要环境影响因素,因此很多小剂量排放的污染物并未计入核算项目;②所选取的污染物项目之间在形成机制和污染影响上具有较好的独立性;③所选取的污染物项目为常见污染物且核算所需的数据较易获得.由于城市的生态压力主要来自资源利用和环境污染 2 个方面,故进一步将生态足迹需求归为两类:资源生态足迹和污染生态足迹,前者包括生物资源、能源和水资源足迹等要素;后者包括水污染、大气污染和固体废弃物污染足迹等要素.

表 1 水资源和环境污染帐户生态足迹核算方法

Table 1 Calculation methods of ecological footprint in water resources and environmental pollutions accounts

帐户类别	组成要素	转换方法	计算项目	土地类型
水资源帐户	生活用水足迹	消费量/水资源全球生产能力 = 生活消费所需的水域面积	生活用水	水资源用地
	生产用水足迹	消费量/水资源全球生产能力 = 生产消费所需的水域面积	生产用水	水资源用地
	大气污染足迹	排放量/单位公顷林地吸收量 = 吸纳大气污染物所需的林地面积	SO ₂ 、NO _x 、PM ₁₀	化石燃料用地
环境污染帐户	水污染足迹	未处理废水排放量 × (未处理废水中污染物平均浓度/地表水环境质量标准浓度限值 - 1) / 水资源全球生产能力 = 稀释水污染所需的水域面积	COD、NH ₄ ⁺ -N、PO ₄ ³⁻ -P	水资源用地
	固体废弃物污染足迹	排放量/单位土地面积固废可堆积量 = 吸纳固体废弃物所需的土地面积	固体废弃物	耕地

1.3.3 城市生态效率计算

根据前述城市生态效率模型定义[式(2)]以及福利与资源环境负荷的测度选择,为了统一量纲以方便比较,计算公式中 HDI 及人均生态足迹均采用基准年的倍数来度量,城市生态效率可具体用下式计算

$$CE = \lambda (HDI) / \lambda (ef) \tag{4}$$

$$CR = \lambda (HDI) / \lambda (ef_r) \tag{5}$$

$$CP = \lambda (HDI) / \lambda (ef_p) \tag{6}$$

式中,CE 为城市生态效率,CR 为资源效率,CP 为环境效率, $\lambda (HDI)$ 为人类发展指数与基准年相比的

变化倍数; $\lambda(ef)$ 为人均生态足迹与基准年相比的变化倍数; $\lambda(ef_r)$ 为人均资源生态足迹与基准年相比的变化倍数; $\lambda(ef_p)$ 为人均污染生态足迹与基准年相比的变化倍数。

进一步由公式(4)~(6)可知,生态效率、资源效率和环境效率三者的关系为:

$$\frac{1}{CE} = \frac{1}{CR} + \frac{1}{CP} \quad (7)$$

可见,城市生态效率会随着资源效率和环境效率的变化而变化,若资源效率和环境效率同时增大,则生态效率也随之增大;若资源效率和环境效率同时减小,则生态效率也随之减小;若资源效率和环境效率的变化趋势相反,则生态效率的变化趋势与变化幅度较大的一方相一致。

2 结果与讨论

2.1 数据来源与计算结果

表2 厦门市2000~2006年人均生态足迹需求/hm²

Table 2 Per-capita ecological footprints in Xiamen from 2000 to 2006/hm²

类别	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
生物资源	1.341	1.391	1.208	1.192	1.152	1.109	0.862
耕地	0.433	0.420	0.420	0.395	0.380	0.402	0.373
林地	0.004	0.006	0.007	0.005	0.007	0.006	0.006
草地	0.017	0.016	0.016	0.016	0.019	0.016	0.014
水域	0.887	0.949	0.765	0.776	0.746	0.685	0.469
能源	1.222	1.233	1.436	1.474	1.799	1.975	2.413
化石燃料用地	0.628	0.565	0.661	0.600	0.868	0.918	1.030
建筑用地	0.594	0.668	0.775	0.874	0.931	1.057	1.383
水资源	0.133	0.151	0.129	0.206	0.219	0.189	0.172
环境污染	1.583	1.535	1.483	1.262	2.035	2.331	2.016
大气污染物	1.497	1.433	1.404	1.102	1.858	2.186	1.895
水污染物	0.086	0.102	0.079	0.160	0.177	0.145	0.120
固体废弃物	6.971E-6	7.651E-6	8.825E-6	9.971E-6	3.278E-6	1.023E-5	1.138E-5
生态足迹总计	4.279	4.310	4.256	4.134	5.205	5.604	5.462

表3 厦门市2000~2006年人类发展指数

Table 3 Human development index in Xiamen from 2000 to 2006

项目	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
预期寿命指数	0.836	0.832	0.841	0.840	0.844	0.847	0.848
教育指数	0.869	0.898	0.900	0.912	0.904	0.937	0.946
人均GDP(PPP)指数	0.787	0.800	0.824	0.845	0.864	0.879	0.896
人类发展指数	0.831	0.843	0.855	0.866	0.870	0.888	0.896

2.2 效率分析

2.2.1 资源效率

资源效率主要从生物资源、能源及水资源消耗3方面来评估。由图2可知,2000~2006年厦门市资源效率总体呈下降趋势,年均约下降2.24%。从3

为了便于与其他地区和城市进行横向比较,本文在计算生态足迹需求时,采用世界粮农组织(Food and Agriculture Organisation,FAO)公布的每公顷相应类型土地的全球均衡产量;在计算煤、燃料和电力等能源的化石燃料用地足迹时,采用文献[23-24]确定的全球平均土地产出率;均衡因子采用Wackernagel^[25]最早计算52个国家和地区时的计算结果,即化石燃料用地1.1、耕地2.8、草地0.5、林地1.1、建筑用地2.8、水域(水产品)0.2、水资源用地1.0^[20]。数据主要来源为2001~2007年《厦门经济特区统计年鉴》、《厦门市环境统计及城考资料汇编》及《厦门市环境质量状况公报》等。在环境污染生态足迹核算中,由于总磷排放量难以获得连续时间序列数据而未包括在水污染足迹实际计算中。表2为厦门市2000~2006年人均生态足迹需求趋势变化,表3为厦门市2000~2006年人类发展指数评价结果,其中后面的倍数计算以2000年为基准年。

种资源的消耗来看,能源的消耗速率最大,水资源次之,生物资源最小。其中,人均能源生态足迹从2000年的1.222 hm²增加到2006年的2.413 hm²,年均增长率高达13.92%。人均水资源的消耗速率也不容忽视,7 a间人均水资源生态足迹增加了0.039

hm^2 年均约上升 4.19%。以上结果表明,随着厦门市社会经济的快速发展,资源消耗不断增长,尽管 HDI 逐年上升,但资源消耗的增长仍快于福利产出的增长,导致资源效率不断降低。其中人均能源生态足迹的增加是导致资源效率降低的最主要原因,尤其是 2004 年后,厦门市第二产业的发展以及人们生活水平的不断提高,导致化石燃料用地的人均生态足迹迅速增大,资源效率大幅下降。这说明厦门市社会经济的发展仍以资源的粗放投入为基础,产业结构还没有摆脱高资源消耗型的模式,其社会福利的增加仍然要靠不断增加资源的投入来实现。

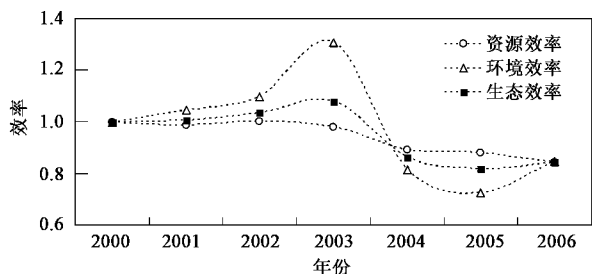


图2 厦门市 2000~2006 年生态效率、资源效率、环境效率变化趋势

Fig.2 Changing trend of the resources efficiency, environmental efficiency and eco-efficiency in Xiamen from 2000 to 2006

2.2.2 环境效率

环境效率评估主要包括大气污染、水污染和固体废弃物污染 3 个方面。从图 2 可以看出,2000~2006 年厦门市环境效率呈现出较大的波动性变化,但总体呈下降趋势,2006 年较 2000 年下降 15.3%,年均下降 2.18%。具体而言,2000~2002 年厦门市环境效率平稳上升,2003 年达到最高值,随后陡然下降,2004 年跌幅较上年达 37.72%,2005 年继续平稳下降,至 2006 年开始小幅回升。通过对污染生态足迹的分析可知,导致环境效率波动的主要因素为大气污染物排放量的变化,其与环境效率的变化趋势基本一致。2000~2003 年人均大气污染生态足迹由 1.497 hm^2 降至 1.102 hm^2 ,从而使环境效率稳步提高。大气环境质量的改善一方面由于厦门市禁止加工、销售、使用燃煤和高污染燃料工作全面展开,另一方面源自机动车尾气治理和旧中巴车报废更新工作取得的重大突破,这一系列措施均使厦门市大气污染物排放量逐步下降。然而 2003 年之后随着厦门市全面推进海湾型城市建设的跨越式发展,不断加大产业结构调整,大力发展工业产业,工业产值增长极为迅速,导致环境污染物的排放量迅速增

加,环境效率持续下降。

2.2.3 生态效率

由图 2 可以看出,厦门市生态效率在 7 a 间呈现出先平稳上升后陡然下降又小幅回升的波动性变化,但总体呈下降趋势,年均下降约 2.21%。总体来看,厦门市创造单位福利所占用的生态足迹不断增大,对资源利用和生态环境的压力也不断增大。尽管福利水平不断提高,然而资源环境负荷的增长逐渐大于福利产出的增长,导致城市生态效率呈现先增加后降低的趋势。结合资源和环境效率的分析可以看出,7 a 间,厦门市的资源效率总体小幅下降,而环境效率的变化较为显著,并与生态效率的变化趋势基本一致。由此可见,导致厦门市生态效率升降的主要因素是环境效率,即环境状况的改善与恶化主导了厦门可持续能力的增强与减弱。从长远来看,厦门可持续能力的增强有待资源效率与环境效率的共同提高^[26]。

2.3 可持续性评价

运用前述城市可持续性评价模型,根据图 2 可知,2000~2006 年厦门市的发展总体上经历了由可持续性增强到可持续性减弱的演变。从阶段变化趋势来看,其中 2000~2002 年生态效率平稳上升,2003 年达到最高值。其中,2000~2001 年厦门市 HDI 与生态足迹同时增长,但生态效率仍得到提高,走的是可持续性次增强路径,即发展的同时也增大了资源环境压力,但仍得到控制;2001~2003 年走的是可持续性增强路径(HDI 增长且生态足迹减少),社会经济发展的同时资源环境得到改善,结合环境效率的分析可以看出其主要原因是厦门市加大环境污染末端治理力度使环境效率大幅提高,实现兼顾社会发展和资源环境发展模式的转变;然而 2003~2005 年生态效率逐渐下降,很显然这 3 年厦门市走的是粗放型发展路径,虽然社会经济发展水平不断提高,但生态足迹增长大于福利,最终导致可持续发展能力不断减弱,这表明 2003 年之后,厦门市经济的跨越式发展对资源利用和自然环境造成很大的压力,使得资源消耗总量和环境污染排放量持续增加,资源和环境效率均急剧下降,最终导致生态效率呈下降趋势;2006 年又小幅回升,说明 2005~2006 年厦门市又重新走上了可持续能力增强的路径,开始向改善的趋势发展。

3 结论

(1) 本文综合生态足迹、人类发展指数和生态

效率的理论方法,建立了基于生态效率的城市可持续性评价模型,并将其应用于厦门市的实例研究中。研究显示,厦门市生态效率呈现先平稳上升后陡然下降又小幅回升的波动性变化;相应的,其可持续性也经历了由可持续性次增强→可持续性增强→可持续性减弱→可持续性增强路径的转变,总体趋势仍是可持续性减弱。这表明随着厦门市城市化进程的不断推进,其社会经济发展水平不断提高,但尚未摆脱资源环境高消耗性的发展模式。进一步分析,环境效率是导致生态效率和可持续性变化的主要因素,其中大气环境和水环境状况的改善和恶化是导致厦门市可持续性增强和减弱的主要原因。

(2)当前,厦门市应通过以下途径来增强城市可持续性:高效利用区域现有资源存量,优化能源利用结构;积极开发风能、太阳能等清洁能源,减少对化石能源的依赖;加大对“三废”污染的治理力度,着力加强对水污染和大气污染防治的监督管理。

参考文献:

- [1] Bloom D E, Canning D, Fink G. Urbanization and the wealth of nations [J]. *Science*, 2008, **319**: 772-775.
- [2] Nourry M. Measuring sustainable development: Some empirical evidence for France from eight alternative indicators [J]. *Ecol Econ*, 2008, **67**(3): 441-456.
- [3] Singh R K, Murty H R, Gupta S K, et al. An overview of sustainability assessment methodologies [J]. *Ecol Indic*, 2009, **9**: 189-212.
- [4] 吴健生,李萍,张玉清. 基于生态足迹的城市地域可持续发展能力评价——以深圳为例 [J]. *资源科学*, 2008, **30**(6): 850-856.
- [5] Hara K, Uwasu M, Yabar H, et al. Sustainability assessment with time-series scores: a case study of Chinese provinces [J]. *Sustainability Science*, 2009, **4**(1): 81-97.
- [6] 赵志强,李双成,高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用——以深圳市为例 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(5): 2223-2231.
- [7] 李锋,刘旭升,胡聘,等. 城市可持续发展评价方法及其应用 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(11): 4793-4802.
- [8] Lee Y J, Huang C M. Sustainability index for Taipei [J]. *Environ Impact Assess*, 2007, **27**(6): 505-521.
- [9] WBCSD. Eco-efficiency: creating more value with less impact [R]. Conches-Geneva Switzerland: World Business Council for Sustainable Development, 2000. 4-10.
- [10] 吕彬,杨建新. 生态效率方法研究进展与应用 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(11): 3898-3906.
- [11] 张妍,杨志峰. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(8): 3124-3131.
- [12] 官冬杰,苏维词. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(10): 1716-1722.
- [13] Antrop M. Sustainable landscapes: contradiction, fiction or utopia? [J]. *Landscape Urban Plan*, 2006, **75**(3,4): 187-197.
- [14] 赵景柱,崔胜辉,颜昌宙,等. 中国可持续城市建设的理论思考 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1244-1248.
- [15] Munier N. Handbook on urban sustainability [M]. Dordrecht: Springer, 2007. 35-88.
- [16] Graymore M L, Sipe N G, Rickson R E. Regional sustainability: How useful are current tools of sustainability assessment at the regional scale? [J]. *Ecol Econ*, 2008, **67**(3): 362-372.
- [17] Leigh A, Wolfers J. Happiness and the human development index: Australia is not a paradox [J]. *Aust Econ Rev*, 2006, **39**(2): 176-184.
- [18] WWF. Living planet report 2006 [R]. Gland, Switzerland: World Wide Fund for Nature, 2006. 14-19.
- [19] UNDP. Human Development Report 2007/2008-Fighting climate change: Human solidarity in a divided world [R]. New York: United Nations Development Program, 2008. 356-360.
- [20] 洪辉. 基于生态足迹法的西安市水资源生态足迹研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
- [21] 白钰,曾辉,魏建兵,等. 基于环境污染账户核算的生态足迹模型优化——以珠江三角洲城市群为例 [J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(8): 1789-1796.
- [22] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. *Water Res Manage*, 2007, **21**: 35-48.
- [23] Kitzes J, Wackernagel M. Answers to common questions in Ecological Footprint accounting [J]. *Ecol Indic*, 2009, **9**: 812-817.
- [24] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B. Calculating national and global ecological footprint time series: Resolving conceptual challenges [J]. *Land Use Policy*, 2004, **21**(3): 271-278.
- [25] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. Ecological footprints of nations: How much nature do they use? How much nature do they have? [R]. Toronto: International Council for Local Environmental Initiatives, 1997. 1-32.
- [26] 刘纯彬,张晨. 资源型城市绿色转型内涵的理论探讨 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, **19**(5): 6-10.