

基于能值分析的国家可持续发展实验区可持续性评估

李俊莉^{1,2}, 曹明明²

(1. 曲阜师范大学 地理与旅游学院, 山东 日照 276826; 2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 国家可持续发展实验区是我国实施可持续发展战略的重要实验示范基地, 实验区发展的可持续评估研究具有重要意义。以榆林实验区为例, 采用能值分析方法, 从能值总量、能值集约度、能值效率角度构建实验区能值评价指标体系, 通过可持续发展指数(ESI)、改进的可持续发展指数(SDI)、生态效率指数(UEI)评价了实验区持续发展水平。结果表明, 实验区 ESI 不断减小, 而且处于远大于 10 的状态, 表明该实验区经济发展水平仍处于不发达状态; 实验区 SDI 逐年减小, 意味着单位环境压力下的社会经济利益逐年降低; 实验区 UEI 逐年减小, 表明城市自组织能力、发展潜力以及再生循环能力有待提高。研究证明能值分析方法提供了一种对实验区可持续性判定的新途径, 该方法对实验区发展水平的评价更为客观, 而且能够消除实验区研究类型障碍, 进而实现对不同等级, 不同规模实验区可持续水平的评估与比较, 对于寻求实验区发展症因和优化实验区发展具有现实意义。

关键词: 国家可持续发展实验区; 能值分析; 可持续性评估

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)06-0172-05

中图分类号: F290, F062.2

Assessing Sustainability of China National Sustainable Communities Based on Emergy Theory

LI Jun-li^{1,2}, CAO Ming-ming²

(1. College of Geography and Tourist, Qufu Normal University, Qufu, Shuandong 273165, China;

2. College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: China National Experimental Sustainable Communities(CNSC_s) are of great importance as the experimental and demonstration bases regarding the sustainable development strategy carried in China. Evaluating the sustainable development level is one of the key topics of CNSCs study. Based on the concept of emergy, we established an assessment index system considering emergy total, emergy intensive degree and emergy efficiency, and proposed three indices including emergy sustainable index(ESI), sustainable development index(SDI), and urban eco-efficiency index(UEI). Taking the CNSC_s of Yulin City as an example, we evaluated the sustainable development level using the established approach. The results showed that, from 2000 to 2008, the ESI was much larger than 10 but kept reducing continually, indicating that the economic development level of Yulin City was still underdeveloped. The SDI decreased year by year, implying reducing social and economic benefits under the environment pressure. The UEI also decreased gradually, suggesting that the self-organizing capacity, the development potential and the recycling capacity of Yulin City still needed to be improved. Emergy analysis method provides a new ways to assess the sustainability of CNSC_s, which generates more objective assessing results. The method can be used to evaluate and compare the sustainable level of CNSC_s of different levels and different sizes by eliminating the obstacles induced by the differences of research objects. It has a direct significance for identifying the development problems and optimizing development strategies of the CNSC_s.

Keywords: China National Sustainable Communities; emergy analyses; sustainability evaluation

国家可持续发展实验区(简称“实验区”, China National Sustainable Communities(CNSCs))是《中

国 21 世纪议程》在地方层面的实践, 是可持续发展思想的实践载体。该项目旨在探索不同类型地区经济、

社会和资源环境协调发展的机制和模式,为不同类型地区实施可持续发展战略提供示范。截止目前,国家共审查批准建立国家级实验区 113 个。实验区是探索可持续发展理论的基地,其可持续水平的研究非常必要,据此可探寻其发展的优势和劣势,为下一步可持续发展寻求科学发展的对策。然而目前关于实验区可持续水平的研究主要是基于某些评价指标,对某一类型或者某个实验区的分析评价,无法突破类型障碍,实现对不同等级,不同规模实验区可持续水平的评估与比较,致使实验区可持续水平的研究无法向广度和深度推进^[1-10]。

实验区具有贯彻国家可持续发展战略,推动社会经济全面协调发展的鲜明特点。基于此,本研究力求避免以往的研究局限,运用能值分析评价方法,重新审视实验区的社会经济行为,探寻经济、社会、资源环境协调发展的模式;在核算、整合原有能值指标的基础上,构建了实验区能值评价指标体系,为科学评价实验区可持续水平提供了一种新思路;并将其应用于榆林实验区 9 a 发展动态的综合分析研究中,试图解析制约榆林实验区可持续发展的主要因素,确定实验区可持续发展的合适路径,进而为实验区可持续水平研究的进一步深化,为实验区创建及规划的编制提供决策参考。

1 研究区概况

榆林市位于陕西省最北部,平均海拔 1 000~1 500 m,平均降水量 316.4~513.3 mm,属于温带半干旱大陆性季风气候。自然资源丰富,现已发现 8 大类 48 种矿产,其中 20 多种已探明储量,潜在价值超过 4.60×10^{13} 元。1998 年被批准为国家能源化工基地,是国家“西煤东运”的腹地、“西气东输”的源头、“西电东送”的枢纽。现辖 1 区 11 县,该市总面积 43 578 km²,总人口 334.73 万人,2008 年全市实现 GDP 达 1 008 亿元,增速连续 7 a 保持全省第一。

近年来随着能源化工基地的开发建设,榆林市国民经济飞速发展。大规模、高强度、超常规的开发建设,使榆林原本就很脆弱的生态环境面临更大的压力,人口、资源、环境与发展之间的矛盾日显突出。矿产资源属于耗竭性资源,由于经济发展对资源依赖程度过高,粗放式开采,产品附加值低,开采周期短,可持续性不足,很多资源型城市(铜川、大庆市)在资源开采衰竭后,经济陷入困境。为了避免榆林市重蹈其他城市的覆辙,2008 年榆林市被确定为循环经济试点城市,2009 年在榆林市设立了国家级可持续发展实验区,旨在探索以循环经济为理念的资源高效利用途径,实现城市的健康、持续发展。

2 研究方法

2.1 能值分析理论及意义

Odum^[11]于 20 世纪 80 年代创立的能值分析理论,是从系统生态角度出发,将自然生态系统与人类经济系统相结合,以太阳能能量为基本衡量单位建立的一套价值理论体系;它与能量流图相结合,可以实现对不同尺度、不同类型系统的综合研究。能值方法将环境要素纳入能值计算范畴,体现了环境及其服务功能对于经济发展的贡献,通过将各种要素换算成统一的太阳能值单位,有利于可持续发展分析中各指标的计算和比较^[11];该方法可弥补货币价值方法的不足,常用来评估自然资源对生态经济系统的作用,是政策分析和决策研究的有力手段。该理论已在国内外得到了较为广泛的应用,我国学者于 1990 年代中期将能值理论应用于生态经济系统的分析,并对我国新疆、广州、江苏、浙江、青海、甘肃、陕西等不同等级的系统进行了个案研究,为衡量区域可持续发展水平,制定区域可持续发展对策提供了良好的依据^[11-20]。

2.2 能值评价指标体系

本研究根据 2001 至 2009 年《榆林市统计年鉴》、《陕西统计年鉴》及相关资料,采用 Odum 的全球能流功率基准 9.44×10^{24} sej/a,选取榆林实验区社会经济系统中主要能流、物流和货币流的原始数据,运用能值转换率公式计算基本太阳能值,确定出各能值指标值作为可持续发展评估的基础资料,在整合原有能值评价指标体系的基础上,从能值流量、能值集约度、能值效率及可持续发展 4 个层面构建实验区能值评价指标体系(表 1)。其中,能值流量以系统自身能值状况为重点;能值集约度以系统能值使用特征为核心;能值效率以系统经济、资源利用效率为主线;可持续发展以系统综合发展水平为基础。

2.2.1 流量指标 该指标主要是指系统自身具有的能值流量以及输入输出系统的资源与服务的能值流量,由 6 项指标组成。其中,可更新资源能值投入(R)主要由太阳能、风能、雨水势能、雨水化学能和水力发电等因素构成;不可更新资源能值投入量(N)为区域内煤、石油、天然气、火电、原盐、焦炭等资源的能值;输入能值(I)为系统购买的资源与服务能值;输出能值(O)为系统向外界输出的资源与服务能值;总能值(U)为系统拥有的总“财富”,在数值上等于系统自身具有的可更新和不可更新自然资源能值与输入能值之和;废弃物能值(W)是污染物排放产生的能值,在数量上等于废水、废气、废渣能值之和,作为系统内部正熵产生。

表 1 2000—2008 年榆林实验区能值指标汇总

| 层面指标 | 能值指标 | 2000 年 | 2001 年 | 2002 年 | 2003 年 | 2004 年 | 2005 年 | 2006 年 | 2007 年 | 2008 年 |
|-----------------|---|--------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 流量 指标 | 可更新资源能值/ $(10^{21} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1})$ | 7.87 | 8.08 | 6.71 | 6.29 | 9.38 | 9.95 | 9.95 | 9.33 | 10.00 |
| | 不可更新资源能值/ $(10^{22} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1})$ | 3.75 | 4.93 | 5.95 | 7.41 | 9.16 | 11.8 | 18.30 | 21.20 | 27.20 |
| | 输入能值/ $(10^{19} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1})$ | 1.08 | 5.06 | 0.34 | 3.77 | 0.57 | 8.31 | 10.50 | 11.40 | 13.20 |
| | 输出能值/ $(10^{19} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1})$ | 2.72 | 5.20 | 5.55 | 5.72 | 7.47 | 8.91 | 10.60 | 11.50 | 14.10 |
| | 废弃物能值/ $(10^{21} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1})$ | 1.97 | 0.37 | 2.06 | 2.36 | 2.59 | 1.93 | 6.44 | 3.06 | 2.32 |
| | 总能值/ (10^{22} sej/a) | 4.54 | 5.74 | 6.63 | 8.04 | 10.10 | 12.80 | 19.30 | 22.20 | 28.20 |
| 集约度 指标 | 能值货币比/ $(10^{13} \text{ sej} \cdot \$^{-1})$ | 3.57 | 3.67 | 3.37 | 3.25 | 3.00 | 3.28 | 3.05 | 2.44 | 1.96 |
| | 人均能值量/ (10^{16} sej/人) | 1.39 | 1.75 | 2.01 | 2.41 | 3.00 | 3.79 | 5.46 | 6.66 | 8.45 |
| | 能值密度/ $(10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2})$ | 1.04 | 1.32 | 1.52 | 1.85 | 2.32 | 2.94 | 4.43 | 5.09 | 6.47 |
| 效率 指标 | 能值自给率(ESR) | 0.83 | 0.86 | 0.90 | 0.92 | 0.91 | 0.92 | 0.95 | 0.96 | 0.96 |
| | 能值废弃率(EWR) | 0.25 | 0.05 | 0.31 | 0.38 | 0.28 | 0.19 | 0.65 | 0.33 | 0.23 |
| | 环境负荷率(ELR) | 4.77 | 6.11 | 8.87 | 11.8 | 9.76 | 11.88 | 18.41 | 22.77 | 27.15 |
| | 能值产出率(EYR) | 4 194 | 1 134 | 19 761 | 2 134 | 17 768 | 1 542 | 1 834 | 1 938 | 2 136 |
| | 可更新资源能值比 | 0.17 | 0.14 | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| | 不可更新资源能值比 | 0.83 | 0.86 | 0.90 | 0.92 | 0.91 | 0.92 | 0.95 | 0.96 | 0.96 |
| | 废弃物能值比 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| 可持续 发展 指标 | 可持续发展指数(ESI) | 880.07 | 185.64 | 2227.29 | 180.89 | 1819.84 | 129.76 | 99.62 | 85.11 | 78.67 |
| | 改进的可持续发展指数(SDI) | 350.64 | 180.85 | 134.57 | 119.13 | 138.41 | 121.02 | 99.22 | 84.70 | 73.80 |
| | 生态效率指数(UEI) | 115.79 | 22.44 | 190.54 | 12.43 | 145.78 | 9.17 | 4.65 | 3.42 | 2.72 |

2.2.2 集约度指标 该指标用以表征能值使用的密度、方式及系统的开发程度,包括能值货币比、人均能值量和能值密度 3 项指标。能值货币比即一个国家或地区单位货币相当的能值量,等于全年使用的总能值与 GNP 的比率,该值在某种程度上体现了系统货币购买能力的大小;人均能值指标是比人均货币量更为客观、真实地反映一个地区居民生活标准的指标,该值可用于反映资源、商品等真实财富的可利用程度;能值密度描述了单位时间某一面积的能值流动情况,用于度量在一个系统中能值在空间上的流动浓度,该值越大,表明系统开发程度越高,在发展等级中地位越高,同时也表明系统经济对系统环境的压力越大^[20]。

2.2.3 效率指标 社会经济系统的发展以自然生态环境为基础,以经济活动为重点,因而能值效率评价指标应包括反映资源利用效率、污染物排放效率及经济效率的相关指标,具体包括 7 项指标。其中,能值自给率(emergy self-sufficiency ratio, ESR)用来评价系统对自有资源的利用情况及系统自我支持能力,ESR 越大表示系统对自有资源开发利用程度越高,系统自我支持能力越强;能值废弃率(emergy waste ratio, EWR)用来评价系统对废弃物的再利用程度及系统的循环能力,EWR 越大,表示系统的废弃物排放量较大,废弃物再生资源化水平较低,废弃物的可利用程度较高;环境负荷率(environmental loading ratio, ELR)是对经济系统的一种警示,较高的 ELR 表明经济系统中存在高强度的能值利用,环境系统的

压力较大,系统平衡容易遭到破坏(一般来讲,当 $ELR < 3$ 时,表明环境压力很小;当 $3 < ELR < 10$ 时,表明环境压力处于中等水平;当 $ELR > 10$ 时,表明环境压力已经相当大);能值产出率(emergy yield ratio, EYR)是衡量系统产出对经济贡献大小的指标,EYR 越大,表示在相同经济能值投入下系统的产出能值越大,运行效率越高;可更新资源能值比反映系统的环境潜力;不可更新资源能值比和废弃物能值比分别从资源利用和废物排放角度度量系统的运行效率^[18]。

2.2.4 可持续发展指标 可持续发展既要保证适度的社会经济的增长与结构优化,又要保证资源的永续利用和生态环境的优化,从而达到生态环境与社会经济相协调,实现持续共进、有序发展^[20]。可持续发展评价指标主要包括可持续发展指数(emergy sustainability index, ESI);改进的可持续发展指数(sustainable development index, SDI);生态效率指数(urban eco-efficiency index, UEI) 3 项。其中,ESI 是由美国生态学家 Brown 和意大利生态学家 Ulgiati 提出的评价系统可持续发展能力的综合性评价指标,定义为净能值产出率(EYR)与环境负荷率(ELR)的比值,一般 ESI 值在 1~10 之间表明经济系统富有活力和发展潜力;ESI > 10 是经济不发达的象征;ESI < 1 为消费型经济系统^[17]。SDI 是在 ESI 的基础上考虑能值交换率的可持续发展指数,是评价系统可持续发展能力的复合性评价指标,SDI 值越高,意味着单位环境压力下的社会效益越高,系统的可持续发展性能

越好,同时在可持续发展的长远尺度上越具竞争优势^[19];UEI为能值产出率、不可更新资源能值比和废弃物能值比的函数,该指数克服了ESI和SDI指数的不足,将系统社会经济系统与生态环境压力同时考虑,可全面反映社会经济系统的健康、活力及可持续发展状态。UEI越高,说明系统自组织能力、发展潜力以及再生循环能力越强,可持续发展性能越好^[18]。

3 结果分析

3.1 能值流量

根据表1,从能值流量来看,榆林实验区9a中可更新资源、不可更新资源能值,输入、输出能值及总能值持续增加,2008年分别增至2000年水平的1.3、7.3、12.2、5.2和6.2倍,表明实验区发展程度不断提高,对外界环境的依赖性不断增强,可更新资源能值投入在9a中变化不大。2008年总能值达 2.82×10^{23} sej,其中,不可更新资源能值占总能值的比例由2000年的82.6%上升为2008年的96.4%,表明虽然国家发改委2008年确定榆林市为循环经济试点城市,但榆林不可更新资源消耗的快速增长趋势并未改变。废弃物能值波动较大,2007年开始呈现逐年降低的趋势,说明榆林市对工业排污的末端治理工作取得了一定成效。

总之,能值流量分析结果表明,榆林实验区总体发展程度不断提高,但其持续发展有赖于资源投入结构的改变,即从对不可更新资源的高强度消耗转向更多依赖可更新资源的投入,转向不断致力于资源利用效率和废弃物资源化率的提高。

3.2 能值使用集约度

根据表1可知,2000—2008年榆林实验区能值货币比总体呈下降趋势,即从2000年的 3.57×10^{13} sej/\$下降到2008年的 1.96×10^{13} sej/\$,这主要是由于榆林市GDP增长较快造成的,与陕西省及其它地区相比,榆林市能值货币比较高,如陕西(5.45×10^{12} sej/\$)、甘肃(1.19×10^{13} sej/\$)、浙江(2.82×10^{12} sej/\$)、江苏(3.02×10^{12} sej/\$)等省^[12-16],较高的能值货币比说明榆林市在经济发展过程中使用了大量廉价的自有资源,而且进入经济系统的资源利用效率较低,经济发展水平较低;2000—2008年榆林实验区的人均能值量呈逐年上升的趋势,2008年达 8.45×10^{16} sej/人,远高于我国大部分省份^[12-16],这一方面说明榆林实验区人均生活水平较高,另一方面也说明其在能值利用上存在着巨大的浪费,集约化程度较低(相对于0.59的人口年均增长率,总能值的年均增长率为30.12)。2000—2008年榆林实验区的能值密度

呈逐年上升的趋势,说明实验区经济系统的开发程度在逐年增高,同时,系统的环境压力也在逐年增加。

3.3 能值效率

根据表1可知,榆林实验区引进外部资源逐渐增加,系统能值自给率呈增加趋势。2008年系统能值自给率为96.45%,高于2008年浙江(84.5%)和江苏(76.1%)两省的能值自给率水平,低于2008年陕西(99.26%),甘肃(99.27%),青海(96.76%)等省及中国平均水平(98%)^[12-16],说明榆林实验区的发展对内部资源的依赖程度要高于江、浙等沿海省份,但相对于周边的省份,其对外界能值输入依然具有较大的依赖性。能值废弃率波动较大,总趋势有所降低;废弃物能值比呈现逐年下降趋势,2007年降为1.38%,依然高于陕西省2007年1.32%的水平,表明榆林实验区的循环再生能力随着城市发展有所提升,但总体再生资源化水平不高。环境负荷率呈显著增加的趋势,2008年增至27.15,高于我国各省市^[11-20],表明榆林实验区高速的经济发展以高强度的能值利用及高的环境负荷为代价。能值产出率呈现稳中有升的波动趋势,可更新资源能值比呈现逐年减少的趋势,不可更新资源能值比呈现逐年增长的趋势,显然,榆林市总能值利用的增加主要源自本地不可更新资源的能值利用,而且,其向外界输出的能值量较大,属于资源消耗型和输出型叠加的社会经济系统。

3.4 可持续性评估

3.4.1 可持续发展指数(ESI) 由图1可以看出,2000—2008年虽然榆林实验区可持续发展指数波动较大,但总体呈现下降趋势,且2008年的可持续发展指数远大于10,由于环境负荷率在研究期内不断增长,因而是非常高的能值产出率导致了高的可持续发展指数。显然,榆林实验区经济增长具有较明显的“高物质投入,高污染排放”的特征,而且高物质投入的基础是本地便捷的不可更新资源,所以,其经济增长模式依然属于粗放型的线性增长模式,目前尚未达到“环境库兹涅茨曲线”的拐点。

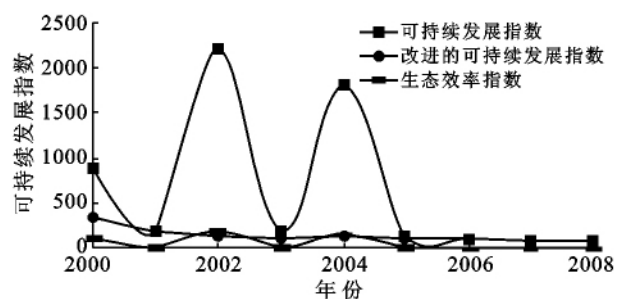


图1 榆林实验区可持续发展水平

3.4.2 改进的可持续发展指数(SDI) 2000—2008年榆林实验区改进的可持续发展指数亦呈现逐年下降的趋势(图1),表明单位环境压力下实验区的社会经济效应在不断下降。所以,实验区应不断提高系统产出能值的能值交换率,避免无谓的交换性能值损失,提高单位环境压力所换取的社会经济效益,从而实现系统模式的优化^[20]。

3.4.3 生态效率指数(UEI) 2000—2008年榆林实验区的生态效率指数亦呈现出非匀速下降的趋势(图1),意味着实验区可持续发展性能较差,换言之,实验区生态效率指数的提高有赖于对系统不可再生资源利用效率,废弃物再生循环能力的进一步提高,即实验区资源效率、环境效率和经济效率的共赢是提高生态效率指数,进而提高可持续发展水平的根本途径。

4 结论

(1) 2000—2008年榆林实验区可持续发展水平不断下降,究其原因主要是由于榆林实验区属于资源消耗型和资源输出型叠加的社会经济系统,经济发展主要依赖于本地资源的开发利用及向外界输出,且对环境的压力不断增大,城市循环再生能力有待提高,对可更新资源的利用还有较大空间。另外,从能值分析角度来看,过度开发本地不可更新资源是引起环境系统恶化的主要原因,要真正实现榆林实验区的可持续发展,必须在不破坏环境的前提下促使系统输出功率最大化。

(2) 榆林实验区亟待推动经济增长方式由粗放型向集约型转变。今后应在原有发展基础上不断进行技术创新和技术转型,提高输入能值的利用效率和废弃物资源化效率;发展替代产业,降低系统对不可更新资源的依赖程度;加大开发可更新资源力度,强化环境保护工作力度,提高单位环境压力的社会经济效益,从而实现系统的可持续发展模式优化。

(3) 可持续发展指数(ESI)着重系统对环境的影响层面,可评估系统的理论可持续能力;改进的可持续发展指数(SDI)不仅考虑系统对环境的影响,而且考虑市场价格因素等社会经济效益,可评估系统的实际可持续能力;生态效率指数(UEI)从系统物质代谢生态效率水平出发,兼顾系统经济和环境效益,可实现对系统多尺度、多方位的综合评估。

(4) 能值分析方法提供了一种对实验区的可持续性判定的新途径。该方法避免了传统可持续发展分析中各指标量纲不一,难以计算和比较的缺陷,能够消除实验区研究的类型障碍,从而实现不同等级和规模实验区可持续水平的评估与比较,对于寻求实验

区发展症因和优化实验区发展有直接的意义。

致谢:本文基础数据的收集得到了陕西师范大学王伟平同学的热情帮助,在此表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 李俊莉,曹明明. 国家可持续发展实验区研究状况及其展望[J]. 人文地理, 2011(1): 66-69.
- [2] 张志强,程国栋,徐中民. 可持续发展评估指标、方法及应用研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 344-360.
- [3] 叶文虎,仝川. 联合国可持续发展指标体系述评[J]. 中国人口·资源与环境, 1997, 7(3): 83-87.
- [4] 朱启贵. 可持续发展评估[M]. 上海:上海财经大学出版社, 1999: 246-316.
- [5] 毛汉英. 山东省可持续发展指标体系研究[J]. 地理研究, 1996, 15(4): 16-23.
- [6] 叶正波. 可持续发展评估理论及实践[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [7] 李善峰. 我国可持续发展实验区的评估理论与指标体系[J]. 东岳论丛, 2003, 24(2): 22-17.
- [8] 徐俊. 县域国家可持续发展实验区协调性的实证研究[J]. 中国软科学, 2008(9): 90-93.
- [9] 科技部社会发展科技司, 中国 21 世纪议程管理中心. 国家可持续发展实验区报告(1986—2006 年)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2006: 11-18.
- [10] 马俊. 人口、资源环境与经济的协调度测定: 以重庆市为例[J]. 资源环境与发展, 2009(1): 19-21.
- [11] 李海涛, 廖迎春, 严茂超, 等. 新疆生态经济系统的能值分析及其可持续性评估[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 765-772.
- [12] 师谦友, 王伟平. 陕西省生态经济系统的能值分析及其可持续发展研究[J]. 统计与决策, 2009(19): 119-122.
- [13] 赵晟, 李自珍. 甘肃省生态经济系统的能值分析[J]. 西北植物学报, 2004, 24(3): 464-470.
- [14] 卓玛措, 冯起, 司建华. 青海生态经济系统的能值分析与可持续发展对策[J]. 经济地理, 2008, 28(2): 308-312.
- [15] 李加林, 龚虹波, 许继琴. 浙江环境—经济系统发展水平的能值分析[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(5): 33-37.
- [16] 李加林, 许继琴, 张正龙. 基于能值分析的江苏生态经济系统发展态势及持续发展对策[J]. 经济地理, 2003, 23(5): 615-620.
- [17] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems[J]. Ecological Modeling, 1998, 108(1/3): 23-36.
- [18] 张研, 杨志峰. 北京城市物质代谢的能值分析与生态效率评估[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1892-1899.
- [19] 陆宏芳, 蓝盛芳, 彭少麟. 系统可持续发展的能值评价指标的新拓展[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 150-154.
- [20] 戴波. 生态资产与可持续发展[M]. 北京: 人民出版社, 2007.