

广州能值生态足迹分析

李智山^{1,2,3}, 黄光庆², 苏泳娴²

(1.中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2.广州地理研究所, 广东 广州 510070; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:基于能值生态足迹模型分析 2005—2009 年广州城市生态足迹和生态承载力, 利用万元 GDP 足迹及可持续生态指数评价广州市发展的可持续性。研究表明, 2005—2009 年间广州生态足迹相对平稳, 长期处于生态赤字状态。随着 GDP 的上升, 生态消费总足迹和本地产出生态承载力都有下降趋势。可持续指数平均值为 0.53, 接近 0.5, 表明广州生态足迹和自然生态承载力大致相当, 区域可持续发展性接近边缘状态。同时, 据此提出广州可持续发展的建议。

关键词:能值; 生态足迹; 生态承载力; 可持续发展; 广州

中图分类号: Q148

文献标识码: A

文章编号: 1004-874X(2012)07-0156-05

Emergy ecological footprint model and its application to Guangzhou

LI Zhi-shan^{1,2,3}, HUANG Guang-qing², SU Yong-xian²

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The paper analyzed the city ecological footprint and ecological capacity of Guangzhou in 2005—2009 based on emergy ecological footprint model. In order to reveal human and natural role fully and accurately, this model included consumption ecological footprint, local products bearing capacity and natural capacity. This paper made use of ten thousand yuan GDP and sustainable ecological index to evaluate the sustainability of the development in Guangzhou. The result showed that: during the time of 2005—2009, ecological footprint of Guangzhou was comparable steady in an ecological deficit situation. Along with the rise of GDP, however, the total ecological consumption footprint and local output ecological capacity appears downtrend. The average index of sustainability was 0.53, close to 0.5. It meant that ecological footprint almost equals to natural ecological capacity in Guangzhou, the sustainable development comes near to a rim condition. The suggestions for sustainable development in Guangzhou were proposed.

Key words: emergy; ecological footprint; ecological capacity; sustainable development; Guangzhou

1992 年, 加拿大生态经济学家 Rees^[1]首先提出生态足迹(ecological footprint, EF)概念, 并将其模型计算方法进行完善。生态足迹法可计算一定区域的人口消费资源及其废物的数量, 根据土地均衡因子转化成相应的生产性土地面积, 即该区域生态足迹。同时计算区域内耕地、林地、草地、水域、化石能源地、建筑用地等 6 种类型土地承载力, 引入产量因子, 将各类土地转换成可比面积。比较生态足迹与生态承载力大小, 当生态足迹大于生态承载力时, 所评价区域人口消费超出生态容量, 处于“生态赤字”状态。由于生态足迹法是一种基于土地标量的方法, 其计算易于操作和可重复性强。该模型自提出后得到广泛应用, 并发展新的计算方式^[2-3], 国内学者^[4-6]也大规模采用。

虽然生态足迹法已被广泛应用, 但众多学者发现生态足迹模型应用上存在缺陷^[7-18]。一是其假设基于封闭系统。在全球尺度应用上, 封闭假设基本成立, 评价结果受该假设影响较小。由于人类经济社会是开放性的系统, 不同区域之间的能量、物质和信息流通与交换是社会经济

生态系统的普遍现象和客观存在^[16]。在国家、省市尺度上应用生态足迹模型时, 如不考虑系统开放性和流通性则会出现误差。另一方面, 城市活动基本依靠外界物质、能量来维持城市生活质量。所以造成城市生态足迹一般会大于城市生产性土地承载力^[14]。在此基础上得出的结论会偏向生态的弱可持续性。传统生态足迹往往得出“经济越发达越不可持续”的悖论。二是对人的能动作用考虑不足。生态足迹模型中没有考虑人类对生态承载力的贡献。人类在农业生产上投入了化肥、机械, 使得粮食产量提高; 建造污水、固废处理厂, 以科技的形式消解废物, 并且效率比大自然的自净能力高。这意味着人类以社会组织生产的方式提供承载力。人类有益的反馈工作, 可以使生态经济系统更有效运转^[14]。

基于此, Odum 等^[20-22]于 20 世纪 80 年代创立能值分析理论。该理论认为, 地球系统内任何形式的能量均源于太阳能, 可将各种物质与能量转换为太阳能值, 单位为太阳能焦耳(sej)。能值分析方法以太阳能值(Emergy)为统一度量衡量各种能量, 解决了不同能量不可加减和比较的问题。Zhao 等^[7]提出基于能值分析的生态足迹(emergy ecological footprint, EEF)模型。将区域内各种能量流通换算成太阳能值, 然后引入能值密度, 将各消费项目的太阳能值换算成相对应的生产性土地面积, 从而计算出研究区

收稿日期: 2012-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(40771218)

作者简介: 李智山(1986-), 男, 在读硕士生, E-mail: lizhishan3@

126.com

域的生态足迹和生态承载力。Chen 等^[8]、Siche 等^[9]比较分析 EF 和 EEF 模型,认为 EEF 模型可弥补 EF 模型的部分缺陷。国内学者^[10-12]也对比了两种生态足迹模型,都证实了能值生态足迹法与传统模型相比,避免了生产性土地因子的限制,较为真实地反映了区域资源。同时,部分学者进一步改进能值生态足迹模型。刘森等^[13]提出应用区域能值能更如实反映区域自然承载力情况。赵志强等^[14-15]进行开放系统下的能值生态足迹研究,考虑了人组织生产的生态承载力。金丹等^[16]考虑了土壤更新能,与冯芳等^[17]研究作比较,发现土壤更新能占自然承载力的 30%以上,并讨论了能值转化率的基准问题。

本文应用 EEF 模型研究 2005—2009 广州市生态足迹与生态承载变化情况,结合万元 GDP 生态足迹与可持续发展评价指数,以期揭示广州市可持续发展状态,为政府部门调整产业发展提供依据。

1 研究方法

1.1 生态承载力计算

1.1.1 自然承载力 自然资源分为可更新资源和不可更新资源。可更新资源提供人类所需要的物质或能量,如农作物、林木、水资源等;另一方面提供城市废物的容纳环境。因此,只有可更新的承载力才是城市可持续发展的源泉。本文以研究区可更新资源为自然承载力,包括太阳辐射能、地表风能、雨水化学能、雨水势能、河水化学能、河水势能、河湾潮汐能及地球旋转能。为避免重复计算,将同一性质资源最大值加和,再除以区域能值密度,计算方法如式(1):

$$EEC = \sum_{i=1}^n (r_i \times T_i) / D \quad (1)$$

式中, i 为可更新资源类型; r_i 为第 i 种可更新资源的原始能量; T_i 为第 i 种资源相应的太阳能值转化率; D 为区域平均能值密度,取研究区域年太阳辐射能、吸收潮汐能及深层地热能总和,再除以区域面积可得。

1.1.2 本地产品承载力 人类不仅消费物质资源,产生废物,同时也主动生产物品,投入资金和科技处理废物。本地产品承载力账户主要考虑研究区域内生产的粮食作物、畜牧产品、水产品、能源产品,以及城市废水、固废处理量等。计算方法如下:

$$LPCC = \sum_{i=1}^n (P_i \times T_i) / D \quad (2)$$

式中, i 为本地产出产品类型; P_i 为第 i 种本地产品的原始能量; T_i 为第 i 种产品相对应的太阳能值转化率。

1.2 生态足迹计算

本文足迹项目分为生物资源、能源和污染足迹。扣除足迹项目中本地产品生产的部分后,即得自然环境需要承担城市活动的物质、能源消费,以及消纳城市废物的容量。计算方法如下:

$$EEF = \sum_{i=1}^n (C_i \times P_i) \times T_i / D \quad (3)$$

式中, i 为足迹类型; C_i 为第 i 种消费项目的原始能量。

1.3 生态盈余/赤字计算

通过式(4)可得研究区生态盈亏情况。若为正值,表示研究区生态承载有盈余,研究区具有可持续性;若为负值,则表示研究区发展超出自然承载,处于生态赤字,需调整发展。

$$EA = LPCC - EEF \quad (4)$$

1.4 可持续发展指数计算

生态盈余/赤字指标可直观反映研究区自然环境对城市发展的承担情况,但不能具体反映研究区对资源的利用程度,金丹等^[16]采用可持续发展指数评价城市可持续性。本文将研究不同承载力下的可持续发展指数比较,计算方法如下:

$$SEI_1 = EEF / (EEC + EEF) \quad (5)$$

$$SEI_2 = EEF / (LPCC + EEF) \quad (6)$$

SEI 值在 0~1 之间。当 SEI 趋于 0 时,说明研究区自然环境存在很大承载空间;当 SEI 等于 0.5 时,承载力与生态足迹相当,区域可持续发展处于边缘状态;当 SEI 接近 1 时,表示生态足迹远大于承载力,自然环境不堪重负。 $SEI=0.5$ 是区域判定研究区发展可持续或不可持续的重要界线。

2 实证分析

2.1 广州区域能值密度

本文以广州为例,研究 2005—2009 广州生态足迹与生态承载变化情况。由于广州处于北回归线附近,多日照多雨,因此广州每年得到的太阳能值高于全球平均值。本文采用区域能值密度^[13],取区域年太阳辐射能、吸收潮汐能及深层地热能总和平均值,除以区域面积。2005—2009 广州年区域储存太阳能值平均值如表 1 所示,计算得到广州区域能值密度:

$$D = \frac{\text{区域年储能值}}{\text{区域面积}} = \frac{3.52 \times 10^{20}}{7.43 \times 10^5} = 4.74 \times 10^{14} \text{ sej/hm}^2$$

表 1 2005—2009 年广州区域太阳能值平均储量

能量类型	能量 (J/年)	能值转化率 (sej/J)	太阳能值 (sej)
太阳辐射能	2.34×10^{19}	1.00	2.34×10^{19}
地热能	9.79×10^{15}	1.20×10^4	1.18×10^{20}
潮汐能	4.12×10^{15}	7.39×10^4	2.11×10^{20}
合计			3.52×10^{20}

2.2 广州市生态承载力

2.2.1 自然承载力 自然可更新资源包括太阳辐射、地表风能、雨水化学能、雨水势能、河水化学能、河水势能、河湾潮汐能及地球旋转能。太阳辐射、地表风能、雨水化学能和雨水势能同属太阳光的转化形式;河水化学能和河水势能为同一过程产物;地球旋转能为另一种性质能量。为避免重复计算,计算自然承载力时,分别取 3 种能量形式下的最大值。依据广州水利厅网站公布的 2005—2009 年广州市水资源公报以及气候数据,参考文献[20,22],确定广州区域可更新资源能值为雨水化学能、河水化学能和地球旋

转能之和,2005—2009 年人均自然承载力变化如表 2 所示。

由表 2 可知,2005—2009 年间,广州人均自然承载力以 2008 年为最高,2007 年为最低。从各可更新资源来看,雨水化学能与河水化学能受区域降雨量和入境水量变化而波动,地球旋转能相对平稳。河水化学能占自然承载力

表 2 2005—2009 年广州人均生态承载力

年份	雨水化学能 (hm ² /cap)	河水化学能 (hm ² /cap)	地球旋转能 (hm ² /cap)	人均自然承载力 (hm ² /cap)
2005	0.48	9.05	0.10	9.63
2006	0.55	9.78	0.09	10.40
2007	0.38	7.09	0.09	7.56
2008	0.55	10.60	0.09	11.20
2009	0.35	7.03	0.09	7.48
平均值	0.46	8.70	0.09	9.26

的最大部分,这是由于广州客水量大。因此,广州在今后发展中需重视入境水资源的保护,以维持区域自然承载力。

2.2.2 本地产品承载力 本地产品承载力账户包括广州农产品(粮食、蔬菜和鲜蛋等)、畜产品(牛肉、羊肉和鲜奶等)、水产品、水资源、能源(发电量、柴油和煤油等)、污染处理量(废水、固废),根据《广州统计年鉴》^[24]和水资源公报,收集本地产品生产数据,引入对应太阳能值转化系数^[14,16,22,24-25],依据公式(2)计算本地产品承载力,2005—2009 年广州人均本地产品承载力如表 3 所示。从表 3 可以看出,广州人均产品承载力约为自然承载力的 5 倍。这是因为在产品承载力中包含能源账户与污染处理量账户,两者比表 1 中可更新资源具有更多太阳能值。农产品、畜产品、水产品、水资源承载力加总则略大于自然承载力,因为这些账户能量、物质来源更依赖于可更新资源。

表 3 2005—2009 年广州人均本地产品承载力

年份	农产品 (hm ² /cap)	畜产品 (hm ² /cap)	水产品 (hm ² /cap)	水资源 (hm ² /cap)	能源 (hm ² /cap)	污染处理量 (hm ² /cap)	人均产品承载力 (hm ² /cap)
2005	8.93	3.17	0.94	0.64	14.94	20.34	48.96
2006	9.04	3.35	1.01	0.79	15.72	21.28	51.20
2007	7.85	2.72	0.94	0.54	17.71	21.00	50.77
2008	7.47	2.96	0.95	0.76	20.83	21.04	53.99
2009	7.45	3.05	0.98	0.52	19.38	21.06	52.43

2.3 广州市生态足迹

根据《广州统计年鉴》和水资源公报,收集本地物质消费数据,包括城市食物消费、能源消耗、污染物产生量,引入对应太阳能值转化系数^[14,16,22,24-25],依据公式(3)计算生态足迹,2005—2009 年广州人均生态足迹变化如表 4 所示。

由表 4 可知,2005—2009 年间广州人均生态足迹总趋势为缓慢上升,2008 年人均足迹为 5 年间最大值。各账户足迹中,能源账户和污染账户占据最大比重,约占人均消费足迹的 80%。畜产品足迹值比农产品和水产品高,表示广州市民饮食结构处于高级水平,需消耗较多肉食品和奶制品。

表 4 2005—2009 年广州人均生态足迹

年份	农产品 (hm ² /cap)	畜产品 (hm ² /cap)	水产品 (hm ² /cap)	水资源 (hm ² /cap)	能源 (hm ² /cap)	污染排放量 (hm ² /cap)	人均生态足迹 (hm ² /cap)
2005	1.77	8.41	0.56	0.73	22.05	21.34	54.86
2006	1.70	8.04	0.55	0.68	23.19	23.49	57.64
2007	1.62	8.76	0.50	0.65	25.95	23.07	60.55
2008	1.64	8.08	0.45	0.64	27.68	23.57	62.05
2009	1.62	8.08	0.48	0.63	27.27	23.22	61.29

3 结果与分析

3.1 万元 GDP 生态足迹及万元 GDP 本地产品承载力

万元 GDP 生态足迹可间接反映区域经济活动对资源的利用效率,万元 GDP 本地产品承载力则间接反映本地产品对经济活动的支持程度。2005—2009 年广州万元 GDP 生态足迹/承载力变化如图 1 所示。《广州统计年鉴》显示,广州 GDP 从 2005 年的 5 154.23 亿元稳步增至 2009 年的 9 112.76 亿元。

从图 1 可以看出,随着广州经济的增长,万元 GDP 生态足迹和承载力都呈下降趋势,两条折线间的差距即为

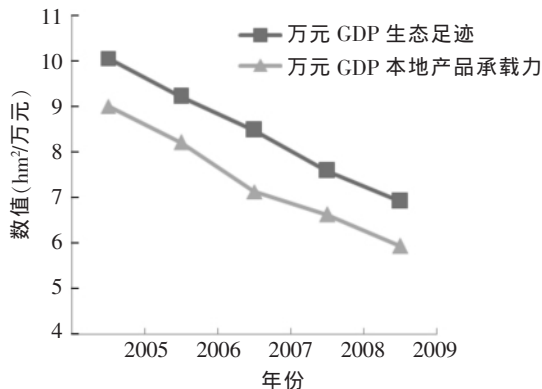


图 1 2005—2009 年广州万元 GDP 变化

广州经济发展中需从外地补充资源的部分。这一方面表示广州市在5年发展中提高了生物生产用地面积和能源消耗的利用效率,另一方面也显示由于城市人口的增多及能源需求的上升,广州经济活动对本地产品的依赖程度下降,广州市在今后的经济发展中更需要外地资源的输入支持。

3.2 生态盈亏

将表3和表4数值依公式(4)计算,得到研究区生态盈亏变化(图2和图3)。从各账户盈余来看,除农产品与水产品为盈余外,其他账户都出现赤字。这可能与广州粮食作物以水稻为主,一年两熟,地处珠江三角洲,淡水及海水产品丰富有关。由于广州居民饮食水平较高,需较多牛羊肉和鲜奶产品,然而本地畜牧业规模不及北方城市,需从外地输入畜产品。水资源账户则在5年内互有盈亏,供需大致保持平衡。能源与污染赤字从2005年至2007年都逐渐扩大,2008年有所减小,2009年赤字又扩大。2005—2009年广州人均生态赤字面积分别为5.88、6.44、9.78、8.06、8.85 hm²。其总趋势是逐渐扩大,2007年人均生态赤字为5年间最大值。

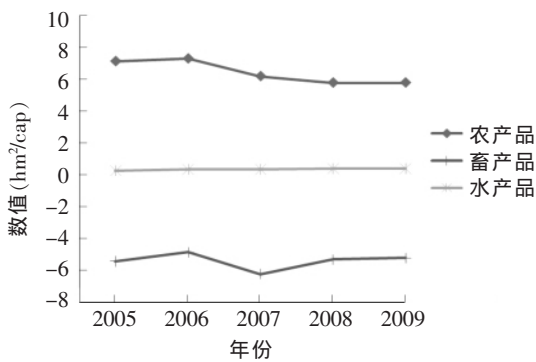


图2 生态资源账户盈余

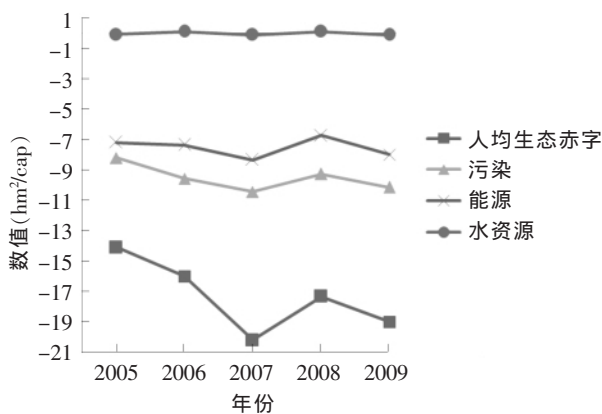


图3 人均生态盈余(非生物资源账户)

3.3 可持续发展指数

根据公式(5)和公式(6),计算两种可持续发展指数(表5),以考察不同承载力的可持续情况。从表5可以看出,广州两个可持续发展指数变化不大,但从两个不同指数可得到不同结论。2005—2009年广州可持续发展指数1均在0.85以上,最大值达0.9,平均值为0.88,接近1。表明

广州生态足迹远大于自然承载力,处于不可持续状态。2005—2009年广州可持续发展指数2则接近0.5,表明广州处于可持续发展边缘状态。

由可持续发展指数1可知,可更新资源已不能承担城市活动,需对研究区可更新资源进行保护,避免生态环境崩溃。由于自然承载力只考虑区域可更新资源,不包括化石燃料的产出,而且城市是开放的系统,经济活动消费账户含有外地输入部分,这部分物质消耗的是研究区外的承载力。因此,仅用本地自然承载力评估研究区可持续发展状况会产生一定的误差。

本地产品承载力反映人类能动生产与自然资源结合的成果,一方面只考虑本地实物产出,排除外地物质;另一方面能有效体现人也是承载力的生产者。可持续发展指数2平均值为0.53,表明广州生态足迹略超过本地产品承载力,虽处于生态赤字状态,但生态环境尚能维持正常运转,也符合广州实际环境状况。因此,广州在今后应需调整升级行业,提高能源利用效率,进一步加大污染处理的资金与科技投入,提高本地承载力。取以本地承载力为分母的可发展指数评价广州市可持续性情况,结果也较为客观。

表5 2005—2009年广州可持续发展指数

年份	可持续发展指数1	可持续发展指数2
2005	0.87	0.53
2006	0.86	0.53
2007	0.90	0.54
2008	0.86	0.53
2009	0.90	0.54
平均值	0.88	0.53

4 广州可持续发展对策建议

4.1 以广佛同城化为契机,优势互补

研究结果表明,2005—2009年间,广州发展为生态赤字状态,且赤字呈扩大趋势。可持续发展指数平均值为0.53、接近0.5,处于可持续发展边缘。从供给角度上看,广州今后需更多外地资源输入,与邻近城市间的合作、物流互通愈显重要。

《广州市佛山市同城化建设合作框架协议》于2009年签订,广州、佛山两城市将在城市规划、交通基础设施、环境保护、产业协作方面进行合作,强化广州、佛山同城效应,加快推进珠江三角洲区域经济一体化。广州形成了以现代服务业为主的产业结构,佛山则以制造业为主的产业结构,广州、佛山两市未来经济互动频繁,分工协作日益紧密,各取所需,加快区域物质补给,从而降低广州市本地物质供给压力。同时,广佛同城化在优化产业升级和促进合理分布人口上都能发挥重大作用和生态意义。

4.2 保护水资源

本研究发现,河水资源占可更新资源比重最大,因此

对河水资源需予以重视和保护,优化分配水资源,保障重点河流;强调水资源利用的可持续性,优先使用当地水资源,后考虑区间外调水,以维持水资源对广州区域的自然承载力。

4.3 适度控制人口规模

适度控制人口总量能有效地生态足迹的总量,降低人均生态足迹,减少生态赤字。广州人口基数大,2009年广州常住人口达1 033万人,其中城镇人口达853万人。广州户籍人口一直保持稳定的低生育水平,自然增长率每年在0.62%以内,人口自然增长以迁移人口增长为主。广州要控制人口总量快速增长,应考虑控制迁移部分的快速增长。一是调整人口结构,积极引进高素质人才,转移密集型产业劳动人口;二是优化人口分布,在城市外围建设居住新城,引导人口合理分布。

4.4 优化产业升级,实现低碳发展

本研究发现,广州能源足迹和污染足迹约占人均消费足迹的80%,因此未来广州需进一步调整行业发展,积极调整能源结构,推广使用清洁能源,减少能源消耗,加大对节能减排的科技与经济投入;扶持低碳产业发展,建设新能源产业基地;倡导低碳生活方式,培育全民低碳意识,营造低碳消费文化氛围,建设低碳城市。

参考文献:

- [1] Rees W. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. *Environmental Urban*, 1992, 4: 121-130.
- [2] 蒋依依,王仰麟,卜心国,等.国内外生态足迹模型应用的回顾与展望[J].*地理科学进展*, 2005, 24(2): 13-23.
- [3] 白钰,曾辉,魏建兵.关于生态足迹分析若干理论与方法论问题的思考[J].*北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(3): 493-500.
- [4] 李飞,宋玉祥,刘文新,等.生态足迹与生态承载力动态变化研究——以辽宁省为例[J].*生态环境学报*, 2010, 19(3): 718-723.
- [5] 陈成忠,林振山,梁仁君.基于生态足迹方法的中国生态可持续性分析[J].*自然资源学报*, 2008, 23(2): 230-236.
- [6] 郭秀锐,杨居荣,毛显强.城市生态足迹计算与分析——以广州为例[J].*地理研究*, 2003, 22(5): 654-662.
- [7] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [8] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emergy—a case study of the Chinese society [J]. *Ecological modelling*, 2006, 198: 101-114.
- [9] Siche R, Pereira L, Agostinho F, et al. Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study [J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [10] 张芳怡,濮励杰,张健.基于能值分析理论的生态足迹模型及应用——以江苏省为例[J].*自然资源学报*, 2006, 21(4): 653-659.
- [11] 王建源,陈艳春,李曼华,等.基于能值分析的山东省生态足迹[J].*生态学杂志*, 2007, 26(9): 1505-1510.
- [12] 陈春锋,王宏燕,肖笃宁,等.基于传统生态足迹方法和能值生态足迹方法的黑龙江省可持续发展状态比较[J].*应用生态学报*, 2008, 19(11): 2544-2549.
- [13] 刘森,胡远满,常禹,等.基于能值理论的生态足迹方法改进[J].*自然资源学报*, 2008, 23(3): 447-457.
- [14] 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): 2220-2231.
- [15] 赵志强,高江波,李双成,等.基于能值改进生态足迹模型的广东省1978—2006年生态经济系统分析[J].*北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5): 861-867.
- [16] 金丹,卞正富.基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用[J].*生态学报*, 2010, 30(7): 1725-1733.
- [17] 冯芳,黄巧华,金爽.基于能值分析的徐州市生态足迹计算[J].*国土与自然资源研究*, 2009(1): 8-10.
- [18] Wei Xiaohong, Li Zi zhen. Ecological value at risk: the temporal analysis of the emergy ecological footprint and biological capacity in Gansu, China 1980-2020 [J]. *Ecological Economics*, 2009, 67(4): 376-379.
- [19] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making* [M]. New York: John Wiley, 1996.
- [20] Odum H T, Brown M T, Williams S B. *Handbook of Emergy Evaluation. Folio #1: Introduction and Global Budget*. Gainesville: Center for Environmental Policy [M]. Gainesville: University of Florida, 2000.
- [21] Odum H T. *Handbook of Emergy Evaluation. Folio #2: Emergy of Global Processes*. Gainesville: Center for Environmental Policy [M]. Gainesville: University of Florida, 2000.
- [22] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳.生态经济系统能值分析[M].北京:化学工业出版社, 2002.
- [23] 广州统计局. *广州统计年鉴(2006-2010)* [M]. 北京:中国统计出版社, 2010.
- [24] Kampeng Lei, Zhishi Wang, ShanShin Tonc. Holistic emergy analysis of Macao [J]. *Ecological Engineering*, 2008(32): 30-43.
- [25] 严茂超,李海涛,程鸿,等.中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估[J].*北京林业大学学报*, 2001, 23(6): 66-69.