

基于能值理论的西安市浐灞生态区 生态系统可持续性分析

滕腾¹, 赵丹², 陈新新¹, 王智宇¹, 马俊杰¹

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 西咸新区能源金融贸易区园区管理办公室, 陕西 西安 712000)

摘要: [目的] 对西安市浐灞生态区生态系统的可持续性进行分析评价, 为该区生态系统的健康、可持续发展提供理论支持。[方法] 基于能值理论, 从社会经济和生态环境两方面选取相应的指标对浐灞生态区 2004, 2009, 2014 年的 3 个重要发展阶段进行对比研究。[结果] 西安市浐灞生态区基于能值可持续指数 (ESI) 在 2004—2009 年由 0.003 4 下降到 0.002 4, 但在 2014 年又增加到 0.005 1, 研究区可持续性总体上呈现上升趋势; 从能值富集的角度分析研究区的可持续性, 能值富集度指标 (EIE) 2004, 2009, 2014 年的结果分别是 0.82, 0.82 和 0.59, 反映研究区是一个能值高度富集的区域。[结论] 由于西安市浐灞生态区是高度发展的消费导向型经济且存在地域面积狭小, 自然资源匮乏, 过度依赖外界能值等问题导致其可持续发展能力处于较低水平, 但同时能值可持续指数 (ESI) 表明浐灞生态区可持续性在提升, 浐灞生态区是一个能值高度富集的区域, 浐灞生态区能值财富的持续高度富集是其能够快速发展的重要原因。

关键词: 生态系统; 能值分析; 可持续性; 西安市浐灞生态区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)02-0228-08

中图分类号:

文献参数: 滕腾, 赵丹, 陈新新, 等. 基于能值理论的西安市浐灞生态区生态系统可持续性分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 228-235. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.037. Teng Teng, Zhao Dan, Chen Xinxin, et al. Ecosystem sustainability of Chan-Ba ecological district of Xi'an City based on emergy theory [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 228-235.

Ecosystem Sustainability of Chan-Ba Ecological District of Xi'an City Based on Emergy Theory

TENG Teng¹, ZHAO Dan², CHEN Xinxin¹, WANG Zhiyu¹, MA Junjie¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2. Xixian New Area Energy Finance and Trade Zone Park Management Office, Xi'an, Shaanxi 712000, China)

Abstract: [Objective] The ecosystem sustainability of the Chan-Ba Ecological District of Xi'an City was evaluated to provide theoretical support for the ecological system from the aspects of health and sustainable development. [Methods] Based on emergy theory, the author selected the corresponding indicators from two aspects of social economy and ecological environment, to compare and study the developments in three important stages of 2004, 2009 and 2014, in Chan-Ba Ecological District. [Results] The ecological sustainabilities of Chan-Ba Ecological District in Xi'an City dropped from 0.003 4 to 0.002 4 from 2004 to 2009, but increased to 0.005 1 in 2014. The overall sustainability of the study area showed an increase trend. The sustainability of the study area is analyzed from the view of energy enrichment. The energy indexes of enrichment (EIE) in 2004, 2009 and 2014 were 0.82, 0.82 and 0.59, respectively. The study area was a highly enriched area. [Conclusion] Because the Chan-Ba Ecological District in Xi'an City is a highly developed consumer-oriented economy with its small area, scarce natural resources and over-reliance on external energy, which lead to its low sustainable development ability. The emergy sustainability index (ESI) indicated that the sustainability of Chan-Ba Ecological District was improved. The Chan-Ba Ecological District is a highly energy-intensive

收稿日期: 2017-08-28

修回日期: 2017-10-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“干旱区生态城镇规划与地方资源利用研究与示范”(2013BAJ03B02)

第一作者: 滕腾(1992—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 硕士研究生, 主要研究生态规划和环境影响评价。E-mail: 904301243@qq.com。

通信作者: 马俊杰(1962—), 男(汉族), 陕西省户县人, 博士, 教授, 主要从事环境影响评价及规划研究。E-mail: xdhjvip@163.com。

area. The continued high enrichment of energy wealth of Chan-Ba Ecological District is of great importance to its rapid development.

Keywords: ecosystem; emergy analysis; sustainable; Chan-Ba Ecological District of Xi'an City

随着城市化进程的不断加快,城市发展过程中不可避免地出现生态环境问题,城市生态系统可持续性的研究已经成为一个重要方向。城市生态系统拥有许多复杂的能量流动,为综合分析生态系统内部各种能量的流动趋势及其相互作用,量化分析城市生态系统可持续性,特引入了基于能值理论的生态系统可持续性分析方法。其中 Odum 等^[1]于 20 世纪 80 年代创立能值研究方法,以太阳能为共同的基础参照标准,量化了整个生态经济系统中的能量,成功解决了不同能量之间无法转换的问题,为不同能量之间的统一评价提供了方法。能值分析理论不仅丰富了生态学与经济学的定量研究方法,亦是联结生态学和经济学桥梁,它对自然资源的合理利用与科学评价、经济发展方针的制定以及可持续发展战略的实施皆具有重要意义。近年来已经在各种生态系统价值分析和评估以及可持续发展方面得到广泛的应用^[2-5],本文将能值分析的方法运用到灞生态区的生态系统可持续性研究中,量化评价灞生态区的生态系统状况,为灞生态区的健康、科学、可持续发展提供理论支持。

1 基于能值生态系统可持续分析方法

生态系统是一个复杂的复合型系统,包含了社会经济和生态环境两个子系统。本文在研究生态系统可持续性时,分别构建不同能值指标来对应不同的子系统^[6-8]。

1.1 生态系统的能值指标的构建

在社会经济子系统中能值密度(emergy density, ED)直接反映了区域能值的集约程度和强度;人口承载力是指目前生活标准下考虑可更新资源和进口资源的人口承载量;人均能值(emergy used per person, EUPP)指总人口与总能值的比值,反映了研究区居民生活水平和经济发展程度;净能值产出率(net emergy yield ratio, NEYR)是指出口能值与进口能值的比值,其值越大,表明系统的环境资源能值与经济反馈能值的利用效率越高;能值货币比率(emergy money ratio, EMR)可以反映出城市的开发程度,工业化程度以及经济现代化程度,其值高,代表单位经济活动换取的能值高,生产过程中使用自然资源比值较大;电力能值比是电力能值与总能值的比。在生态环境子系统中环境负载率(environmental loading ratio, ELR)反映了区域环境所承受的压力,若区域负

载率高说明生态经济系统中高强度能值的利用,会对当地环境产生较大压力;不可更新资源能值比反映系统的资源利用结构;废弃物为系统生产过程中的副产品,本身有很高的能值,但是不能被生态系统所利用,因此废弃物产生率(waste producing ratio, WPR)表示生态系统受到的威胁程度和环境压力。

1.2 生态系统健康可持续能值指数

在基于能值的生态系统可持续发展的研究中, Brown 和 Ulgiat^[9]提出了能值可持续指数(emergy sustainability index, ESI),即 $ESI = NEYR/ELR$ 。还指出若其数值是在 1~10 之间,则说明生态系统具有强大的活力以及很好的发展前景;若数值大于 10,则说明系统对其内部的可更新资源开发不充分、大量使用系统中的不可更新资源或者进口能值的使用量过少;若数值小于 1,则说明系统是存在着对进口能值过度依赖的问题。但是,ESI 在衡量国家的可持续发展能力时,由于其面积广阔,有着丰富的可能新资源导致其 ELR(环境负载率)很小;但是在城市等小尺度的研究当中由于地域面积狭小,资源匮乏其 ELR(环境负载率)往往很高,所以可能会导致 ESI 在不同尺度下的值差距很大,在不同尺度下不具有互相参考意义只可作为不同时间上的对比;同时在衡量区域生态系统健康可持续状况时,能值的平衡更为重要。若出口的能值比输入的能值更多,地区经济是不可持续的;如果离开当地的能值比得到的更多,地区经济是不可持续的^[10]。往往较为经济发达的地区其投入能值都大于其输出能值如瑞典和意大利^[11]。为了能够以新的角度分析区域的可持续性,结合灞生态区的特点创新提出以进口能值和出口能值的差与总能值用量的比值构建能值富集度指标(energy index of enrichment, EIE)以能值富集的角度量化分析灞生态区的生态可持续性,其数学表达式为:

$$EIE = \frac{MP - EXP}{U}$$

式中:MP——经济社会能值投入;EXP——总能值产出;U——总能值投入。

在城市发展过程当中,投入的能值比流出的能值多表明能值财富在持续积累,从能值的角度来说这是对系统发展有利的。对于富集度能值指标,其值越高表明区域能值财富富集程度越高,系统发展动力越充足,对区域发展更为有利。对于研究面积狭小,当地资源稀缺,依靠大量能值投入来推动发展的城市区域

来说单纯的用 ESI 来和其他地区比较是不全面的,但对同一区域不同时间段的对比研究具有一定的意义。能值富集指标可从新的角度来考虑区域可持续发展能力,对小尺度的研究区域来说更加适用。

2 研究区概况

灞河生态区位于陕西省西安市主城区东部,东西长 10 km,南北 25 km,是西安市重点发展的“四区两基地”之一,也是西安市“十一五”规划的建设重点之一,规划总面积 129 km²,其中集中治理区 89 km²。

在灞河生态区成立之初,灞河地区面临着严峻的生态环境形势,主要包括:①河流污染,灞河是西安是东部区域的污水汇集地,年接纳污水量达 5.00×10^7 t,占西安市污水排放总量的 1/6。灞河年径流量 1.80×10^8 m³,其中 1/5 是污水,每天排入灞河的污水约 1.20×10^5 m³。②垃圾围城,沿灞、灞河岸有 10 余处河段垃圾成山,垃圾堆放量近 5.00×10^6 m³。③挖沙成灾,过度挖沙造成灞河床严重下切达 6 m 之深,地质灾害隐患严重。经过约 10 a 的发展灞河生态区在桃花潭景观工程、雁鸣湖湿地工程、灞河碧水工程、灞河入渭处国家级湿地公园工程等生态工程的建设中已累计修复湿地 1 133 hm²,建成林地 1 933 hm²,修建生态堤防 36 km,污水集中收集处理率达到 95%,河流水质由劣 5 类恢复到地表 3 类,负氧离子含量达到 2 000~6 700 单位,远高于世界卫生组织清新空气的标准(1 000 单位)。

3 资料来源以及数据处理方法

3.1 资料来源

本研究数据是来源于《西安市统计年鉴》《陕西省

统计年鉴》《灞河生态区总体规划》《灞河生态区经济发展规划》以及其他实地收集的相关资料,分类并归后获得了 2004,2009,2014 年灞河区生态环境基础现状,GDP、社会产出水平等经济统计数据,并参照蓝盛芳^[6]、Odum 等^[1]研究中有关能值指标的计算方法和能值转换率,得到统一的转换后的太阳能值数据。将整个研究区生态系统分成两部分:①以绿地、水体为主的生态环境子系统(表 1—2);②以农用地、商业、居住、建设等用地为主的社会经济子系统(表 3),最终将 2 个子系统数据合并后得到西安市灞河生态区生态经济系统的能值流简表(表 4)。

3.2 能值计算方法

基于能值理论,生态系统能值投入有可更新能值投入(R_E),其包括太阳能、风能、雨水能等;来自生态环境的不可更新能值投入(N_E),如生物多样性保护等;来自社会经济子系统的不可更新资源(R_S),包括人力、苗木、有机肥等,以及来自社会经济子系统的不可更新资源(N_S),包括农药、化肥、煤炭、石油、钢材、火电等。

能值(M)是指物质能值转换率与物质能量或质量的乘积。能值转换率表示单位能量(J)或物质(g)所具有的能值,即单位能量或物质由多少太阳能值转化而来,它是度量能量质量和等级的尺度。

$$M = \tau \cdot B$$

式中: M ——能值; τ ——能值转换率; B ——能量或物质的质量。

3.2.1 生态环境子系统能值计算 生态环境基础数据来源于西安市气象局、灞河生态区管委会以及《西安市统计年鉴》,相关能值指标的计算结果详见表 1—2。

表 1 灞河生态区水体能值计算结果

| 能值类别 | 原始数据 | | | 能值转换率 (sei/单位) | 太阳能值/sei | | |
|------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|
| | 2004 年 | 2009 年 | 2014 年 | | 2004 年 | 2009 年 | 2014 年 |
| 太阳能/J | 1.44E+16 | 3.19E+16 | 3.69E+16 | 1.00E+00 | 1.44E+16 | 3.19E+16 | 3.69E+16 |
| 风能/J | 7.02E+13 | 6.23E+13 | 1.80E+14 | 6.23E+03 | 4.37E+16 | 9.66E+16 | 1.12E+17 |
| 雨化学能/J | 1.22E+13 | 1.54E+04 | 2.94E+13 | 1.54E+04 | 1.88E+17 | 4.50E+17 | 4.53E+17 |
| 雨势能 J | 1.03E+13 | 8.98E+03 | 2.47E+13 | 8.98E+03 | 9.16E+16 | 2.17E+17 | 2.20E+17 |
| 可更新生态投入小计 | | | | | 3.38E+17 | 7.96E+17 | 8.22E+17 |
| 水体景观营造投入 | 0.5 亿元 | 3.23 亿元 | 1.15 亿元 | 5.87E+12 | 3.58E+19 | 2.79E+20 | 1.11E+20 |
| 不可更新经济投入小计 | | | | | 3.58E+19 | 2.79E+20 | 1.11E+20 |
| 蒸发化学能/J | 2.35E+13 | 4.95E+13 | 5.66E+13 | 2.94E+04 | 6.91E+17 | 1.46E+18 | 1.66E+18 |
| 蒸发势能/J | 1.98E+13 | 4.16E+13 | 4.76E+13 | 8.98E+03 | 1.78E+17 | 3.74E+17 | 4.27E+17 |
| 气候调节/\$ | 8.71E+05 | 1.92E+06 | 2.23E+06 | 5.87E+12 | 6.23E+17 | 1.66E+18 | 2.14E+18 |
| 生态产出 | | | | | 1.49E+18 | 3.49E+18 | 4.23E+18 |
| 娱乐文化/\$ | 0 | 4.43E+06 | 5.63E+06 | 5.87E+12 | 0 | 2.60E+19 | 3.30E+19 |
| 经济产出小计 | | | | | 0.00E+00 | 2.60E+19 | 3.30E+19 |

表 2 浐灞生态区绿地能值计算结果

| 能值类别 | 原始数据 | | | 能值转换率 sei/单位 | 太阳能值/sej | | |
|-------------|----------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 2004 年 | 2009 年 | 2014 年 | | 2004 年 | 2009 年 | 2014 年 |
| 太阳能/J | 2.20E+16 | 5.12E+16 | 6.72E+16 | 1.00E+00 | 2.20E+16 | 5.12E+16 | 6.72E+16 |
| 风能/J | 1.07E+14 | 2.50E+14 | 3.28E+14 | 6.23E+03 | 6.67E+16 | 1.56E+16 | 2.04E+17 |
| 雨化学能/J | 1.86E+13 | 4.67E+13 | 5.35E+13 | 1.54E+04 | 2.86E+17 | 7.19E+17 | 8.24E+17 |
| 雨势能/J | 1.57E+13 | 3.92E+13 | 4.50E+13 | 8.98E+03 | 1.40E+16 | 3.48E+17 | 4.00E+17 |
| 可更新生态投入小计 | | | | | 5.17E+17 | 1.27E+18 | 1.50E+18 |
| 绿地建设资金投入/\$ | 1.16E+08 | 2.32E+08 | 1.70E+08 | 5.87E+12 | 6.81E+20 | 1.36E+21 | 9.98E+20 |
| 不可更新经济投入小计 | | | | | 6.81E+20 | 1.36E+21 | 9.98E+20 |
| 蒸发化学能/J | 3.59E+13 | 7.92E+13 | 1.03E+13 | 2.94E+04 | 1.06E+18 | 2.33E+18 | 3.03E+18 |
| 蒸发势能/J | 3.02E+13 | 6.66E+13 | 8.66E+13 | 8.98E+03 | 2.71E+17 | 5.98E+17 | 7.78E+17 |
| 水源涵养/J | 4.81E+06 | 1.12E+07 | 1.45E+07 | 5.87E+12 | 2.26E+19 | 6.57E+19 | 8.51E+19 |
| 土壤形成/J | 9.39E+06 | 2.18E+07 | 2.83E+07 | 5.87E+12 | 5.51E+19 | 1.28E+20 | 1.66E+20 |
| 固氮/g | 1.48E+07 | 3.18E+07 | 4.35E+07 | 3.80E+09 | 5.62E+16 | 1.21E+17 | 1.65E+17 |
| 固磷/g | 1.45E+06 | 2.23E+06 | 3.37E+06 | 1.40E+10 | 2.03E+16 | 3.12E+16 | 4.72E+16 |
| 固钾/g | 4.46E+06 | 7.31E+06 | 1.10E+07 | 1.10E+09 | 4.91E+15 | 8.04E+15 | 1.21E+16 |
| 污染物净化/\$ | 4.81E+06 | 1.12E+07 | 1.48E+07 | 5.87E+12 | 3.70E+19 | 8.61E+19 | 1.13E+20 |
| 气候调节/\$ | 4.64E+05 | 1.30E+06 | 1.90E+06 | 5.87E+12 | 2.73E+18 | 7.62E+18 | 1.12E+19 |
| 生态产出小计 | | | | | 1.19E+20 | 2.91E+20 | 3.79E+20 |
| 娱乐文化/\$ | 4.81E+06 | 1.12E+07 | 1.45E+07 | 5.87E+12 | 1.13E+18 | 2.63E+18 | 3.41E+18 |
| 绿植垃圾堆肥产量/\$ | 1.16E+06 | 3.27E+06 | 4.70E+06 | 5.87E+12 | 6.81E+18 | 1.92E+19 | 2.76E+19 |
| 经济产出小计 | | | | | 7.94E+18 | 2.18E+19 | 3.10E+19 |

太阳能=(研究区面积)×(太阳年水平总辐射),其中研究区太阳年水平总辐射照取 4.574×10^9 J/($m^2 \cdot a$)。

风能=(高度)×(空气密度)×(涡流扩散系数)×(风速梯度)²×(总面积)

雨水化学能=(面积)×(年平均降水量)×(密度)×(吉布斯自由能)

雨水势能能值=(土地面积)×(平均降水量)×(雨水密度)×(重力加速度)×(平均海拔高度),其中研究区海拔高度按 437 m 计算。

生物多样性保护以研究区高等植物和主要野生动物种数平均到单位水体或者绿地面积的数量计算;气候调节、娱乐文化、污染物净化等以谢高地有关中国陆地水体生态系统相关生态能值分析等^[11],通过能值货币比率换算,研究区开展垃圾分类,将大量的绿植垃圾进行堆肥处理,因此根据腐殖肥料的产量计算区域的部分生态产出量。

3.2.2 社会经济子系统能值计算 太阳能、雨水能等可更新能源同生态环境子系统算法相同。

小麦、玉米等可更新资源的投入能值=单位面积产量(kg/hm^2)×能量折算标准(J/kg)

原煤、天然气等不可更新资源为外来资源的能值=单位面积用量(t/hm^2)或实际消费量×能量折算标准(J/kg),其中原煤折算标准为 3.18×10^{10} J/t,原油

折算标准为 4.71×10^{10} J/t,电力折算标准为 3.6×10^6 J/k,天然气折算标准为 3.89×10^7 J/t;国际旅游收入与实际利用外资根据研究区统计数据,按照能值货币比率计算,单位面积人力计算,利用研究区职工工资(全市在职职工工资总额平均到每 $1 hm^2$ 建设用地面积),并按照当年美元汇率计算;研究区主要的工业排放源来自两个供热站,根据供热站的年燃煤使用量按照孟志浩^[13]及方品贤环境统计手册^[14]计算出烟气排放量;经济产出来自于统计部门。计算结果详见表 3。

4 结果与分析

4.1 能值指标分析

图 1 为能值总量演变图。由图 1 可知,研究区总能值投入中的绝大多数能值是由经济社会投入的,表明研究区对生态环境的投入处于很低的水平。自 2004—2009 年间总能值投入中不可更新能值占到了近 85%,到 2014 年降至 76%,表明研究区生态投入有所回升,区域生态系统在朝着好的方向发展。但是根据表 1 可以发现,研究区绝大多数能值投入来自于社会经济子系统,生态能值投入则相对稳定且规模较小,同时研究区大量的能值需求都要依靠外界能值的输入,过于依赖外界的能值投入致使区域自我维持能力处于较低的水平。

表 3 泸瀾生态区社会经济系统能值计算结果

| 能值类别 | 原始数据 | | | 能值转换率/ sei | 太阳能值/sej | | |
|----------------------------|----------|----------|----------|---------------|----------|----------|----------|
| | 2004 年 | 2009 年 | 2014 年 | | 2004 年 | 2009 年 | 2014 年 |
| 太阳能/J | 1.19E+17 | 1.83E+17 | 2.28E+17 | 1.00E+00 | 1.19E+17 | 1.83E+17 | 2.28E+17 |
| 地表风能/J | 5.81E+14 | 8.91E+14 | 1.11E+15 | 6.23E+03 | 3.28E+17 | 5.55E+17 | 6.94E+17 |
| 雨化学能/J | 1.00E+15 | 1.30E+14 | 1.04E+14 | 1.54E+04 | 1.55E+19 | 2.57E+19 | 2.80E+19 |
| 雨势能/J | 8.44E+14 | 1.09E+14 | 8.79E+13 | 8.98E+03 | 7.50E+18 | 1.25E+19 | 1.36E+19 |
| 可更新生态投入小计 | | | | | 2.34E+19 | 3.90E+19 | 4.25E+19 |
| 表土净损耗能/J | 1.75E+14 | 9.87E+13 | 5.12E+13 | 6.25E+04 | 1.09E+19 | 6.17E+18 | 5.45E+17 |
| 不可更新生态投入小计 | | | | | 1.09E+19 | 6.17E+18 | 5.45E+17 |
| 钢及钢材/t | 1.12E+03 | 9.81E+03 | 3.78E+03 | 4.65E+15 | 5.27E+18 | 4.56E+19 | 3.00E+18 |
| 塑料/t | 7.30E+01 | 9.73E+02 | 1.32E+03 | 6.60E+15 | 4.82E+17 | 6.42E+18 | 1.49E+18 |
| 水泥/t | 1.09E+04 | 4.29E+04 | 3.64E+04 | 1.98E+15 | 2.16E+19 | 8.50E+19 | 1.23E+19 |
| 纸/t | 1.68E+03 | 5.23E+03 | 1.95E+03 | 3.90E+15 | 6.55E+18 | 2.04E+19 | 1.30E+18 |
| 氮肥/t | 8.39E+03 | 4.96E+03 | 2.76E+03 | 4.62E+15 | 3.88E+19 | 2.29E+19 | 2.17E+18 |
| 磷肥/t | 3.29E+03 | 1.84E+03 | 1.05E+03 | 6.88E+15 | 2.26E+19 | 7.18E+18 | 1.23E+18 |
| 原煤/J | 9.48E+14 | 2.20E+15 | 2.70E+05 | 4.00E+04 | 3.79E+19 | 8.80E+19 | 1.08E+20 |
| 原油/J | 5.41E+13 | 7.00E+14 | 6.15E+14 | 5.40E+04 | 2.92E+18 | 3.78E+19 | 3.32E+19 |
| 电力/J | 1.14E+14 | 2.38E+14 | 2.28E+14 | 1.60E+05 | 1.82E+19 | 3.81E+19 | 3.65E+19 |
| 天然气/J | 1.14E+09 | 2.29E+10 | 4.98E+10 | 4.80E+04 | 5.47E+13 | 1.10E+15 | 2.39E+15 |
| 实际利用外资/10 ⁸ \$ | 3.10E-01 | 1.64E+00 | 5.42E+00 | 2.50E+20 | 7.75E+19 | 4.10E+20 | 1.36E+21 |
| 不可更新经济能值投入小计 | | | | | 2.32E+20 | 7.61E+20 | 1.55E+21 |
| 人力/\$ | 1.94E+07 | 4.87E+07 | 1.33E+08 | 5.87E+12 | 1.14E+20 | 2.86E+20 | 7.78E+20 |
| 可更新经济能值投入小计 | | | | | 1.14E+20 | 2.86E+20 | 7.78E+20 |
| 废气排放量/m ³ | 3.82E+08 | 5.87E+08 | 1.10E+09 | 6.60E+05 | 5.80E+18 | 8.91E+18 | 1.67E+19 |
| 废水排放量/(t·a ⁻¹) | 5.66E+06 | 1.66E+07 | 2.12E+07 | 6.60E+05 | 3.70E+18 | 7.70E+18 | 1.40E+19 |
| 固废/J | 1.73E+13 | 8.12E+12 | 1.17E+13 | 1.00E+05 | 1.74E+18 | 8.12E+17 | 1.17E+18 |
| 废物产出流小计 | | | | | 1.12E+19 | 1.74E+19 | 3.19E+19 |
| 小麦/J | 1.93E+14 | 6.56E+13 | 3.47E+13 | 6.80E+04 | 1.31E+19 | 4.46E+18 | 2.36E+18 |
| 玉米/J | 7.06E+13 | 2.40E+13 | 1.27E+13 | 8.30E+04 | 5.86E+18 | 1.99E+18 | 1.05E+18 |
| 蔬菜/J | 2.10E+14 | 1.31E+14 | 1.01E+15 | 2.70E+04 | 5.67E+18 | 3.54E+18 | 2.73E+18 |
| 植物油/J | 4.16E+11 | 3.27E+13 | 4.10E+12 | 8.60E+04 | .360E+16 | 2.81E+18 | 3.50E+17 |
| 棉花/J | 3.10E+12 | 5.00E+11 | 4.00E+11 | 8.60E+05 | 2.67E+19 | 4.30E+18 | 3.44E+18 |
| 水果/J | 1.89E+13 | 4.18E+13 | 4.70E+12 | 5.30E+05 | 1.00E+19 | 2.22E+19 | 2.49E+18 |
| 肉类/J | 5.20E+11 | 7.40E+12 | 6.60E+12 | 2.00E+06 | 1.04E+18 | 1.48E+19 | 1.32E+19 |
| 奶类/J | 6.54E+13 | 5.87E+13 | 4.82E+13 | 2.00E+06 | 1.31E+20 | 1.17E+20 | 9.46E+19 |
| 禽蛋/J | 3.47E+12 | 4.31E+12 | 3.89E+12 | 2.00E+06 | 6.94E+18 | 8.62E+18 | 7.78E+18 |
| 水产品/J | 1.65E+12 | 2.52E+11 | 2.64E+13 | 2.00E+06 | 3.30E+18 | 5.10E+17 | 5.28E+19 |
| 生态产出小计 | | | | | 2.04E+20 | 1.80E+20 | 1.81E+20 |
| 社会经济产出 | 2.52E+07 | 6.72E+07 | 2.26E+08 | 5.87E+12 | 1.48E+20 | 3.94E+20 | 1.33E+21 |
| 经济产出小计 | | | | | 1.48E+20 | 3.94E+20 | 1.33E+21 |

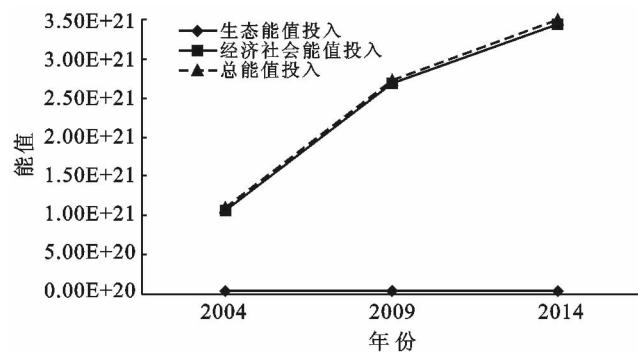


图 1 研究区能值总量演变

根据表 4 数据可知,研究区环境负载率一直在增长由 2004 年的 44.27 增长到 2009 年的 65.59,到 2014 年时已达到 78.31。在 2004—2009 年间,由于研究区在此期间主要以基础设施建设为主,大量的外界能值投入导致其环境负荷率快速增长,而 2009—2014 年间,区域经济的快速发展,研究区在发展经济的同时仍秉持生态发展理念,相继建设了一系列的以水面和绿地为支撑的人工生态系统,因此区域环境负荷率虽因经济的快速发展持续增加但增速放缓。由于生态潜力与环境承载人口有着直接的关系,研究区

2004 年的环境承载人口为 21 万,承载力与实际人口相当,到了 2014 年环境承载人口为 39.60 万人,实际人口达到 42 万,表明研究区在 10 a 间人口发展符合区域承载能力,但是研究区大部分能值是外界输入能值,资源依赖太强,因此在研究区今后的发展中,应更加注重对环境资源的合理利用,充分发挥人力资源在协调总能值的生长速度和人口增长速度方面的作用。

图 2 为研究区净能值产出率演变图,净能值产出率为经济过程中产生的能值与投入能值的比值,其值越大,系统的环境资源能值与经济反馈能值的利用效率越高,由图 2 可知,研究区在 2004—2009 年净能值产出率增长缓慢由 0.15 增长到 0.16,到 2014 年提速幅度较大直接增加到 0.40,表明研究区社会经济发展卓有成效,区域经济发展效率不断提高。

表 4 浐灞生态区 2004、2009、2014 年生态经济系统能值流

| 序号 | 指标名称 | 表达式 | 2004 年 | 2009 年 | 2014 年 |
|----|----------------------------------|---------------------------|----------|----------|----------|
| 1 | 可更新生态能值投入/sej | R_E | 2.43E+19 | 4.10E+19 | 4.40E+19 |
| 2 | 不可更新生态能值投入/sej | N_E | 1.09E+19 | 6.17E+18 | 5.45E+17 |
| 3 | 可更新社会经济能值投入/sej | R_S | 1.14E+20 | 2.86E+20 | 7.78E+20 |
| 4 | 不可更新社会经济能值投入/sej | N_S | 9.49E+20 | 2.40E+21 | 2.66E+21 |
| 5 | 可更新能值 /sej | $R=R_E+R_S$ | 1.38E+20 | 3.27E+20 | 8.23E+20 |
| 6 | 不可更新能值/sej | $N=N_E+N_S$ | 9.60E+20 | 2.41E+21 | 2.66E+21 |
| 7 | 生态能值投入/sej | $E=N_E+R_E$ | 3.52E+19 | 4.72E+19 | 4.54E+19 |
| 8 | 经济社会能值投入/sej | MP | 1.06E+21 | 2.69E+21 | 3.44E+21 |
| 9 | 总能值产出/sej | EXP | 1.56E+20 | 4.42E+20 | 1.39E+21 |
| 10 | 总能值投入/sej | $U=R+N$ | 1.10E+21 | 2.73E+21 | 3.49E+21 |
| 11 | 废弃物能值/sej | W | 1.12E+19 | 1.74E+19 | 3.19E+19 |
| 12 | 人口/人 | | 2.10E+05 | 2.80E+05 | 4.20E+05 |
| 13 | GDP/美元 | | 2.80E+08 | 3.43E+09 | 7.76E+09 |
| 14 | 人均能值(sej/人) | U/P | 5.23E+15 | 9.76E+15 | 8.30E+15 |
| 15 | 能值密度(ED)/(sej·hm ⁻²) | $U/Area$ | 1.23E+17 | 3.07E+17 | 3.92E+17 |
| 16 | 人口承载力/人 | $8 \times (R/U) \times p$ | 2.11E+05 | 2.01E+05 | 3.96E+05 |
| 17 | 净能值产出率(NEYR) | EXP/MP | 0.15 | 0.16 | 0.40 |
| 18 | 能值货币比(EMR) | U/GDP | 3.93E+12 | 7.96E+11 | 4.50E+11 |
| 19 | 电力能值比 | Ele/U | 1.65% | 1.40% | 1.05% |
| 20 | 环境负荷率(ELR) | $(U-R_E)/R_E$ | 44.27 | 65.59 | 78.31 |
| 21 | 不可更新能值比 | N/U | 87.42% | 88.05% | 76.40% |
| 22 | 废弃物产生率(WPR) | W/U | 1.02% | 0.64% | 0.91% |
| 23 | 能值可持续指数(ESI) | NEYR/ELR | 0.0034 | 0.0024 | 0.0051 |
| 24 | 能值富集度(EIE) | $(MP-EXP)/U$ | 0.82 | 0.82 | 0.59 |

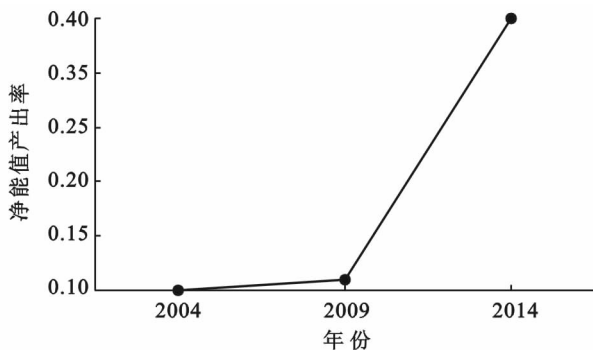


图 2 研究区净能值产出率演变图

由表 4 可知,能值货币比以及电力能值比都出现下滑,能值货币比从 2004 年的 3.93E+12sej/\$ 下降

到 2014 年的 4.50E+11 sej/\$,主要原因是 2004 年浐灞生态区建立之初主要以建设为主,产出相对较低,到 2014 年浐灞生态区的经济产出能力已经得到大幅度提高。而电力能值比指标由 1.65% 下降到 1.40% 直至 2014 年的 1.05%,由于在 2004—2009 年浐灞生态区一直处于大规模建设当中,电力需求较高,到 2014 年浐灞生态区产业结构趋于稳定,主要是以第三产业以及与高科技相关的产业活动为主,耗电量高的加工制造业很少,同时由此可降低由于发电产生的环境污染问题,有效缓解环境压力,以能值的角度来说对区域可持续发展是有利的。从不可更新能值比的数据结果分析,浐灞生态区近 10 a 不可更新

能值比主要呈现下降趋势由 2004 年的 87.42% 下降到 2014 年的 76.40%，不可更新能值占系统总能值用量的比重在不断降低，但是也能看出生态区的系统发展主要还是依靠外界能值的投入而且不可更新能值的使用量在增长。废弃物产生率指标在波动中下降，由 2004 年的 1.02% 下降到 2009 年的 0.64%，到 2014 年增加到 0.91%，虽是波动中下降但是人口的快速增长导致废弃物的产生量在不断增加，生态环境受到的威胁程度在增加，在区域发展过程中应注重提高系统的资源利用以及废弃物循环利用效率，大力发展循环经济。随着泸灞生态区的发展，生态环境虽受到一定程度的威胁，但是好在泸灞生态区的生态环境建设取得了一定的成果，绿地以及水体的面积在扩大，自然环境整体朝着好的方向在发展。

4.2 综合指标分析

从图 3 可知，研究区基于能值可持续指数(ESI)在 2004—2009 年呈现下降趋势由 0.003 4 下降到 0.002 4，但从 2009—2014 年增长明显增加到 0.005 1，主要原因是研究区在大量能值投入的支持下得到了快速发展，2004—2009 年泸灞区一直处于高强度的建设时期，能值投入增长明显，能值产出相对较少，环境负荷明显增加导致 2009 年的 ESI 指标处于较低的水平；到了 2014 年，基础设施建设和生态环境建设基本完成，能值投入增速放缓，能值产出有了明显提高，虽然环境负载率仍在增加但总体上可持续发展能力已经得到很大的提高。

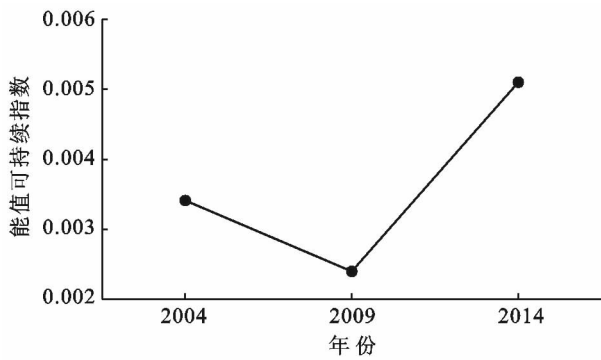


图 3 研究区能值可持续指数演变

由图 4 可知，研究区能值富集度指标一直处于较高的水平 2004 和 2009 年为 0.82，2014 年为 0.59，主要原因是一方面泸灞生态区的进出口一直处于增长的状态，但是能值投入远远高于能值产出；另一方面泸灞生态区的发展是以外界能值投入作为发展动力的，较高的能值富集度表明生态区真正的能值财富在不断贮存增加。在研究区的发展进程中，2004—2009

年一直处于高强度的建设阶段，能值产出很低，能值富集度一直处于很高的水平；到 2014 年研究区生态建设，基础设施建设基本完成，能值产出得到很大的提高，能值富集度有所降低，但是研究区的主要发展动力仍是外界能值投入，所以到了 2014 年能值富集度相对来说依然处于较高水平。研究区能值财富不断贮存，能值产出逐渐增加，产业结构越发合理，研究区生态经济可持续发展能力在不断提高。

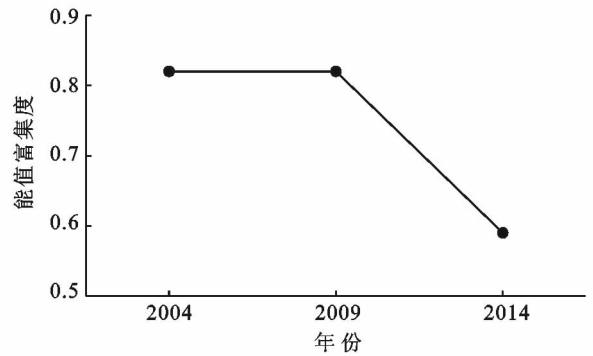


图 4 研究区能值富集度演变

4.3 泸灞生态区与其他城市生态系统状况对比

通过采用能值分析的方法构建相应的能值指标，将系统内各种能流统一为能值尺度，既可以量化分析研究区的可持续发展能力，为城市发展提供科学依据；又可以通过与其他城市或地区比较，为研究区的健康可持续性提供参照标尺。将本文中提出的能值富集度指标与各个相关城市的研究数据进行相应的推算后得到其他城市的能值富集度进行比较。通过(表 5)对比发现，上海和广州 ESI 比澳门和泸灞明显要高。其主要原因是虽然这四个区域的净能值产出率，即出口能值/进口能值，基本在 0.4 左右，但由于上海和广州的 ELR(环境负荷率)比泸灞生态区和澳门低，是由于上海和广州的面积相对较大，资源相对丰富，导致环境负荷率相对较低，因此对于 ESI 值，即 NEYR/ELR，上海和广州相较于泸灞和澳门高。泸灞生态区 EIE 值要高于其他地区，是由于该区域面积相对狭小，总能值投入相较于其他地区小，但是其 MP-EXP，即经济社会能值投入与总能值产出的差值占总能值投入的比重较高，也就是说，处于建设期的泸灞生态区能值财富富集程度高，系统发展动力充足，对区域发展有利，因此可持续性也并不比上海和广州差。故分析讨论城市发展的可持续性并不能只依靠 ESI 的数据，从能值富集的角度看，能值财富的不断贮存也是提高城市可持续发展能力的重要方面。

表 5 灞生态区与不同地区能值富集度指标对比

| 区域 | NEYR | ELR | ESI | MP-EXP | U | EIE | 数据来源 |
|-------------|------|-------|--------|----------|----------|------|--------|
| 灞生态区(2014年) | 0.40 | 78.31 | 0.0051 | 2.05E+21 | 3.49E+21 | 0.59 | 本研究 |
| 上海(2003年) | 0.39 | 17.34 | 0.0225 | 0.74E+23 | 3.09E+23 | 0.24 | 文献[12] |
| 澳门(2003男) | 0.65 | 813 | 0.0008 | 0.66E+22 | 2.20E+22 | 0.30 | 文献[11] |
| 广州(2003年) | 0.43 | 4.74 | 0.0909 | 0.27E+23 | 1.42E+23 | 0.19 | 文献[12] |

通过对比发现(表 6),灞生态区的人均能值与其他 3 个地区差一个数量级,是由于灞面积相对狭小,导致总能值投入小,从而人均能值相对较低。但是能值密度相较于其他 3 个地区较高,是澳门地区的 487 倍,是上海是的 10^5 倍,广州市的 2.00×10^5 倍,主要原因仍是地域面积过于狭小。灞生态区的能值货币比较其他 3 个区域小一个数量级,说明灞生态区的开发程度、工业化程度以及经济现代化程度较低,单位经济活动换取的能值也较低,生产过程中使用自然资源的比值较小。由于灞生态区的人口过少导致废弃物产生率相比澳门、广州和上海要低很多,较低的废弃物产生率,对生态系统的威胁程度会很小。因此从整体来看,虽然灞生态区现在居民的生活水平和经济发展程度相对其他发达地区较低,但是城市生态压力和环境受威胁程度很小,城市生态可持续性相对更好。

表 6 灞与不同地区人均能值、能值密度、能值货币比率和废弃物产生率对比

| 区域 | 人均能值 | 能值密度 | 能值货币比率 | 废弃物产生率/% |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| 灞生态区(2014年) | 8.30E+15 | 3.92E+17 | 4.50E+11 | 0.91 |
| 澳门(2003年) | 4.90E+16 | 8.05E+14 | 2.78E+12 | 13.01 |
| 上海(2003年) | 2.32E+16 | 3.95E+12 | 4.57E+12 | 30.22 |
| 广州(2003年) | 1.97E+16 | 1.91E+12 | 3.79E+12 | 25.85 |

5 结论

灞生态区的 ESI(能值可持续指标)呈现出上升趋势,这与灞生态区的发展理念相辅相成,但是通过数据分析发现 ESI 在不同尺度下不具有相互比较的意义。特引入 EIE(能值富集度指标),其数据表明灞生态区一直处于较高的能值财富富集的发展阶段,以能值的角度分析,能值的平衡更有利于长远的可持续发展,但对于地域狭小,资源匮乏的地方来说能值的不断富集贮存对于系统的可持续发展更加有利。但是从多个指标的分析的过程中发现,灞生态区快速发展的同时快速增长的人口、废物量以及频繁的经济活动都使灞生态区面临一定的压力。今后在提高可持续发展能力过程中灞生态区还有大

量工作要做,不只是单纯地通过景观生态建设来影响区域生态系统的发展,也应从物质、能源、信息的有效循环的角度提升生态系统的良性发展。如利用科技发展促进资源的高效利用,降低单位产品的能值消耗,降低对外界能值投入的依赖程度,降低废弃物的排放量,提升资源的循环利用能力更好地促进生态环境发展。

[参 考 文 献]

- [1] Odum H T, Dimond C, Brown M T. Ecology and Economy: "Emergy" Analysis and Public Policy in Texas [R]. Policy Research Project Report, 1987.
- [2] 王建源,薛德强,田晓萍,等. 山东省农业生态系统能值分析[J]. 生态学杂志,2007,26(5):718-722.
- [3] 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.
- [4] 熊晓波,代力民,邵国凡,等. 生态经济系统的能值分析与可持续发展:以吉林省延边地区为例[J]. 生态学杂志,2004,23(5):206-211.
- [5] 刘浩,王青,李广军,等. 辽宁省循环经济发展水平的能值评估[J]. 生态学杂志,2008,27(2):245-249.
- [6] 蓝盛芳,钦佩. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [7] 黄书礼. 都市生态经济与能量[M]. 中国台北:詹氏书局,2004.
- [8] 蓝胜芳,钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报,2001,12(1):129-131.
- [9] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation[J]. Ecological Engineering, 1997,9(1/2):51-69.
- [10] Brown MT, Ulgiati S. Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments[J]. Population and Environment, 2001,22(5):471-501.
- [11] 李金平,陈飞鹏,王志石. 城市环境经济能值综合可持续发展分析[J]. 生态学报,2006,26(2):439-448.
- [12] 隋春花,蓝盛芳. 广州与上海城市生态系统能值的比较分析[J]. 城市环境与城市生态,2009,31(11):107-109.
- [13] 孟志浩,俞保云. 燃煤锅炉烟气量及 NO_x 排放量计算方法探讨[J]. 环境污染与防治,2006,19(4):1-3.
- [14] 方品贤. 环境统计手册[M]. 四川成都:四川科学技术出版社,1985.