

基于能值的资源型城市新陈代谢过程对比分析

璩路路, 师学义, 刘畅

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要:城市新陈代谢注重分析城市物质、能量和货币的流动过程, 这为探讨不同职能城市的城市代谢过程提供了新的视角。为了探讨不同资源型城市的新陈代谢特点和变化规律, 分别以山西省省会资源型城市太原市和传统资源型城市晋城市为例, 基于太原市和晋城市 2007—2014 年的社会经济数据, 运用能值理论构建了 8 项反映城市新陈代谢的评价指标体系, 从城市新陈代谢系统能值结构、能值使用强度、能值环境压力和新陈代谢产出效率 4 个方面, 对太原市和晋城市 2007—2014 年城市新陈代谢状况进行了对比分析。结果表明: 2007—2014 年, 总体上, 太原市的城市新陈代谢系统能值结构优于晋城市, 晋城市的能值使用强度高于太原市, 晋城市的能值环境压力大于太原市, 太原市的新陈代谢产出效率高于晋城市。通过对比分析后对提高太原市和晋城市的城市新陈代谢过程提出了建议, 为创造性地解决山西省新陈代谢资源与生态风险问题奠定基础, 进而为城市生态管理提供科学依据。

关键词:城市新陈代谢; 能值理论; 代谢特征; 对比分析

中图分类号: F061.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0279-06

Comparative Analysis of Resource-Oriented Urban Metabolisms Based on the Emergy Theory

QU Lulu, SHI Xueyi, LIU Chang

(College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Urban metabolism highlights the processes of materials, energy and money flows of urban system, which provides a new perspective on analyzing the process of urban metabolism of different functional cities. In this paper, in order to explore the similarities and differences of metabolic characteristics and variation rules of different types of resource-dependent cities, taking the capital Taiyuan of Shanxi Province and a traditional resource-dependent city—Jincheng as the example, respectively, we established the urban metabolic evaluation framework by employing a set of eight emergy-based indicators through using socio-economic data from 2007 to 2014, and compared the similarities and discrepancies from perspectives of the urban metabolic emergy system's structure, emergy metabolic intensity, emergy environmental pressure and metabolic output efficiency. The results show that emergy system's structure of Taiyuan is higher than Jincheng on the whole, emergy metabolic intensity of Jincheng is higher than Taiyuan, emergy environmental pressure of Jincheng is greater than Taiyuan, metabolic output efficiency of Taiyuan is higher than Jincheng. The recommendations on improving metabolic process of Jincheng and Taiyuan are put forward in order to lay the foundation for creatively solving metabolic resources and ecological risk, and to provide the scientific basis for ecosystem management of the city in Shanxi Province through comparative analysis.

Keywords: urban metabolism; emergy theory; metabolic characteristics; comparative analysis

城市是一个以人类活动为中心的社会—经济—自然复合生态系统, 是一个具有多层次、多输入、多输出的耗散结构, 它必须从外界获取物质和能量, 不断输出产品和排放废物, 才能保持稳定有序的状态; 同时, 城市犹如一个复杂的有机体, 不断进行新陈代谢,

城市新陈代谢系统是融合了能量、物质、货币和人类劳动的复合巨系统^[1]。城市新陈代谢的研究方法包括物质核算法、社会代谢多尺度综合评估和能值分析法。物质核算法以质量守恒定律为基本依据, 从实物的质量出发(通常以吨为单位), 揭示物质在特定区域

内的流动特征和转化效率,但物质流分析法存在着单位不统一,目前对于不同物质之间的系统集成研究较为乏力。社会代谢多尺度综合评估对城市代谢系统的资源、环境、生态变量解析能力不足。能值分析法将环境—经济系统的过程和产品统一折算成能量单位,将不同能质的能量转换成同一标准加以分析,为定量分析生态系统和经济系统提供了一个衡量和比较各种生态流的共同尺度和度量标准,可以作为城市新陈代谢研究的有效方法。

能值分析理论由生态学家 Odum 创立,该理论全面阐述了系统的内在能量和资源,被广泛应用到城市新陈代谢的研究中^[2-4]。20世纪90年代初,隋春花等^[5]把能值理论和研究方法第一次引入到中国,之后被广泛应用到城市、农业、经济等多个领域,Huang等^[6-7]运用能值方法对台北市物质代谢进行了研究,并探讨了城市景观格局演变、城市发展机制与社会经济系统物质代谢的关系,严茂超等^[8]对西藏的生态资源进行能值分析后得出水资源对未来西藏的可持续发展有着非常重要的意义,黄永斌等^[9]以石嘴山市为例基于能值分析了城市资源与能源的流动过程。以往的研究多从国家、地区尺度对城市代谢系统进行分析,但对于区域中心不同职能城市的对比研究较少。本文运用能值分析方法构建反映城市新陈代谢系统能值结构、能值使用强度、能值环境压力和新陈代谢产出效率的指标体系,对山西省省会资源型城市太原市和传统资源型城市晋城市 2007—2014 年城市新陈代谢状况进行对比分析,为创造性地解决山西省新陈代谢资源与生态风险问题奠定基础,进而为城市生态管理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

太原市(37°27'—38°25'N,111°30'—113°09'E)位于山西省境中央,为山西省省会,总面积 6 988 km²,2014 年总人口 429.89 万,人口城市化率为 85%。太原市作为内陆资源型省区中心,为中国重工业发达地区,已探明矿藏主要有铁、锰、铜、铝、铅、锌等金属矿和煤等非金属矿。近年来,太原市经济保持平稳增长,GDP 从 2007 年的 1 291.77 亿元增长到 2014 年的 2 531.09 亿元,增幅接近 200%。2014 年,第三产业增加值占 GDP 的比重达到 58.47%,第一、二产业的比重则分别为 1.54% 和 39.99%,总体而言,太原市的经济集聚程度较高,规模不断扩大,对于资源的消耗也在不断加剧,城市的运转负担也在不断加大。

晋城市作为山西省东南部典型的矿业资源型城市,

土地总面积 9 490 km²,2014 年总人口达到 219.31 万。晋城市素以丰富的自然资源而著称,在东西长 160 km,南北宽 100 km 的地下蕴藏着煤、煤层气、铁矿石、铝土矿等数十种矿产资源,尤以煤铁为著,晋城地处“沁水煤田”南端,全市范围内有永红煤矿、永安煤矿、寺河煤矿等各大矿区,辖区内更存在着晋煤集团、兰花集团等一系列的煤炭相关产业公司。2014 年晋城市矿业工业总产值 535.4 亿元,占全市 GDP 的 73.2%,有“煤铁之乡”的盛誉,当地资源的开采与经营对城市的社会经济发展具有很大的推动作用。

1.2 数据来源

本文的原始数据来源于山西省环境统计年鉴(2007—2015 年)、太原市统计年鉴(2007—2015 年)和晋城市统计年鉴(2007—2015 年)。

1.3 研究方法

1.3.1 能值分析方法 本文拟采用能值理论方法进行城市新陈代谢分析。能值分析方法常以太阳能为基准来衡量各种能量的能值,即其所具有的太阳能值单位为太阳能焦耳(sej),任何物质及能量生成所需要的太阳能能值比率为能值转换率(sej/J)。本文关于能值分析的基本步骤如下:(1)收集资料。通过查询、计算,收集与研究区相关的自然环境、农业、工业及经济贸易等各种资料,分析研究区城市代谢的主要成分和能值流,建立包括国内生产总值、人口、能源等主要能值流在内的基础资料库。(2)编制能值分析表,列出研究系统的主要能量来源指标;收集能值分析表中各类别资源能量流(物质流)的原始数据,查找能值转换率,通过能值转换率,可获得任何资源、产品或劳务形成所需直接和间接的太阳能值。代谢能值(E_m)的计算公式如下:

$$E_m = \sum_i T_i \times E_i$$

式中: T_i 为输入 i 的能值转换率; E_i 为资源 i 的数量^[10]。

1.3.2 城市新陈代谢系统能值账户 城市新陈代谢系统能值账户是通过城市不同能值组成部门众多能值项目的能值统计,系统阐述城市新陈代谢的整体架构。基于能值的城市新陈代谢系统包括可再生资源能值(R)、非可再生资源能值(N)、进口能值部分(IM)、废弃物能值部分(W)和出口能值(EX),能值转换率采用 Odum, Huang 等学者的研究成果^[11-15];城市新陈代谢不同组成部门、能值项目及所参考的能值转换率(表 1)。其中可再生自然资源能值投入(R)既包括太阳能、风能、雨水化学能、雨水势能、地球循环能等自然形成的,也包括农产品、畜产品和水产品等本地可再生资源能源。不可再生资源能值(N)则包括煤炭、钢材、水泥等不可再生资源能值项目。进、出口资源能值(IM,

EX)主要由进出口商品构成,进口资源能值亦加入了旅游能值部分。最后,废弃物能值(W)由三部分组成,分别为固体废弃物能值、废水能值和废气能值。

表 1 城市代谢系统的能值构成及能值转换率

能值类别	能值项目	单位	能值转换率/ (sej·J ⁻¹)	文献
可再生 源能值(R)	太阳能	J	1	[11]
	风能	J	2.45E+03	[12]
	雨水化学能	J	3.05E+04	[12]
	雨水势能	J	4.70E+04	[12]
	地球循环能	J	5.80E+04	[12]
	农产品	g	4.08E+11	[11]
	畜产品	g	2.50E+11	[11]
	水产品	g	3.02E+10	[11]
	表土损失	t	1.71E+03	[12]
	电能	J	2.69E+05	[11]
不可再生 资源能值 (N)	钢材	g	3.02E+09	[11]
	原煤	J	6.72E+04	[11]
	汽油	J	1.86E+05	[11]
	柴油	J	1.86E+05	[11]
	天然气	J	8.06E+04	[11]
	燃料油	J	6.25E+04	[12]
	化肥	t	8.28E+06	[15]
进口能值(IM)	商品	\$	9.37E+12	[12]
	旅游	\$	1.66E+12	[15]
出口能值(EX)	商品	\$	6.34E+12	[12]
	固体废物	g	1.80E+09	[14]
废弃物能值(W)	废水	g	6.66E+08	[14]
	废气	g	6.66E+08	[14]

1.3.3 城市新陈代谢指标 参考 Odum^[11]的研究成果以及宋涛等^[16]研究中国城市代谢系统而拟建的能值指标体系,并结合 Brown 等^[17]提出系统可持续发展性能的能值指标,本文运用能值分析方法构建反映城市新陈代谢系统能值结构、能值使用强度、能值环境压力和新陈代谢产出效率的指标体系,对山西省

表 2 城市代谢系统能值指标测度

类型	指标	单位	公式	含义
代谢能值结构	总能值使用量(U)	sej	$R+N+IM$	除出口及废弃物能值的总能值
	能值外向度(EER)	1	$(IM+EX)/(U+EX+W)$	代谢系统对外界的依赖程度
代谢强度	能值货币比(EG)	sej/\$	U/GDP	系统流通货币的购买能力
	人均能值福利(EP)	sej/cap	$U/Population$	系统的人均代谢效率
代谢压力	环境负荷率(ELR)	1	$(N+IM)/R$	城市代谢系统环境承压能力
	能值废弃率(EWR)	1	W/R	城市代谢系统的可更新能力
系统产出效率	能值产出率(EYR)	1	$(R+N+IM)/IM$	代谢系统的资源产出能力
	能值可持续指标(ESI)	1	EYR/ELR	代谢系统的可持续发展能力

2 结果与分析

2.1 新陈代谢系统能值结构

在城市新陈代谢系统的总代谢能值构成中,2007—2014年,晋城市和太原市总能值整体上呈增

太原市和晋城市 2007—2014 年城市新陈代谢状况进行了对比分析。本文在原有能值评价指标体系的基础上,从城市新陈代谢系统能值结构、能值使用强度、能值环境压力和新陈代谢产出效率 4 个方面指标构建了城市代谢能值评价指标体系(表 2),代谢能值结构由系统总能值使用量(U)和能值外向度(EER)表征,总能值使用量(U)由可再生资源(R)、不可再生资源(N)和进口资源(IM)能值构成,系统外向度刻画了代谢系统对外界的依赖程度,由代谢系统的能值外向度(EER)指标来刻画,由进口资源(IM)和出口资源(EX)比上总能值构成;新陈代谢强度由能值货币比(EG)和人均能值量(EP)来反映,其中能值货币比是货币财富购买能值能力的综合考量,人均代谢能值(EP)为每人能值拥有量,是代谢系统人口能值福利的表征^[18];城市代谢能值压力指标由环境负荷率(ELR)和能值废弃率(EWR)表征,环境负荷率(ELR)是非可再生能值(N)与进口能值(IM)与可再生能值(R)的比值,其数值较大则表明在系统中存在高强度的能值利用,同时对环境系统保持着较大压力^[19],能值废弃率(EWR)则指评价系统排放的废弃物的可利用程度以及系统的循环能力,该比值越大,说明系统利用资源的效率越低,废弃物再生资源化水平比较低;系统产出率由能值产出率(EYR)和能值可持续指标(ESI)来表征,能值产出率(EYR)为总代谢能值(U)与进口能值量(IM)的比值,是评价投入的效益和当地能值利用程度的指标。系统能值可持续指标(ESI)为能值产出率(EYR)与能值负荷率(ELR)的比值表征单位能值环境负荷下的系统产出效率,是城市新城代谢系统社会经济发展与生态环境与协调度的指标。这些指标从不同的角度对物质代谢能力进行分析,可以从不同侧面反映城市代谢水平。

长趋势且增幅不大,太原市系统总能值使用量由 2007 年的 9.024×10^{23} sej 变为 2014 年的 9.116×10^{23} sej,明显高于晋城市 2007 年的 5.147×10^{23} sej 和 2014 年的 6.422×10^{23} sej 的总能值使用量(图 1),但就增长幅度而言,晋城市的能值使用量增加了

24.76%，高于太原市的1.02%，这说明近年来晋城市运转所涉及物质与能量需求急剧增加，而太原市由于总规模过大，增长潜在空间相对较小。在能值组成中，进出口能值都分别出现了较大的增长，晋城市不可更新资源值的增幅尤其明显，晋城市境内矿产资源丰富，能源资源自给率比较高，2014年生产天然气6.7亿 m^3 ，生产原煤7954万t，远大于太原市生产天然气0.0116亿 m^3 ，原煤3645万t，转换能值数值由2007年的 1.203×10^{23} sej变为2014年的 1.567×10^{23} sej，增加了30.26%，明显高于太原市逐年下降的2007年 1.166×10^{23} sej和2014年的 0.741×10^{23} sej的不可更新资源能值(图2)，为驱动经济发展，太原市越来越倾向于向外部购买资源性能值，因此，城市的对外开放度在不断增大，2007—2014年，能值外向度不断增长，太原市的能值外向度由2007年的0.076上升至2014年的0.142，平均能值外向度为0.105，明显高于晋城市2007年的0.0181、2014年的0.094和晋城市平均能值外向度0.054。

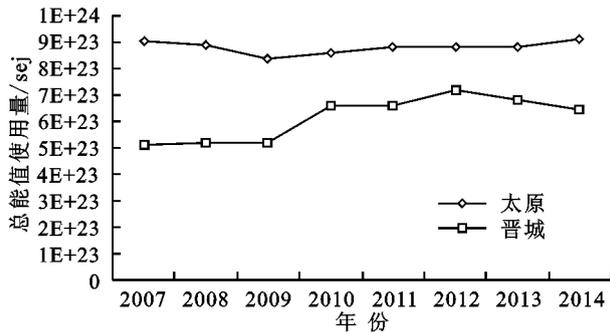


图1 2007—2014年太原市和晋城市的总能值使用量对比

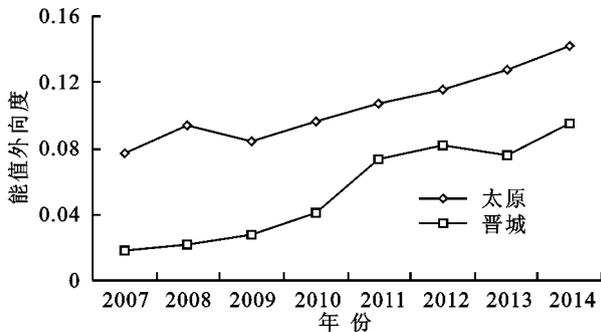


图2 2007—2014年太原市和晋城市的能值外向度对比

2.2 新陈代谢能值使用强度

能值使用强度指标包括能值货币比和人均能值福利两项。通过对能值货币比的测度，可以系统表征货币财富购买能值能力的变化情况，从而系统反映城市代谢系统通量特征。总体而言，太原和晋城的能值货币比呈下降趋势，太原市的能值货币比由2007年 5.31×10^{13} sej/\$降至2014年的 2.74×10^{13} sej/\$，低于晋城2007年的能值货币比 8.90×10^{13} sej/\$和2014年的 4.71×10^{13} sej/\$(图3)。晋城市代谢效

率较高，这是因为每单位经济产出所换取的能值量高，能值财富的增长快于货币财富的增长，经济生产效率较高。太原市近年来城市发展水平在不断上升，货币财富也在不断增长，为驱动经济发展太原市花费了大量的能值财富，但由于低能质的可更新资源的数量有限，花出的货币所含的能值大大低于采购资源本身所含的能值，因此，经济生产的效率性不高。

能值福利指标则主要反映在代谢过程中人均可分配使用的资源量的多少。太原市人均能值福利一直维持在 2.50×10^{17} sej/cap的稳定水平，说明太原市能值增长与人口增长同步，而晋城市的人均能值福利则总体上呈增长趋势，由2007年的 2.40×10^{17} sej/cap升为2012年的峰值 3.29×10^{17} sej/cap，而后达到2014年的 2.93×10^{17} sej/cap，2007—2009年，晋城市人均能值福利和太原市相当，2010—2014年晋城市人均能值福利相对较高(图4)，说明近年来，晋城市能值增长快于人口增长速度，而太原市作为省会，具有强大的吸纳周围城市人才和就业人口的作用，由于过多过快的人口增长，致使人均能值福利要低于晋城市。

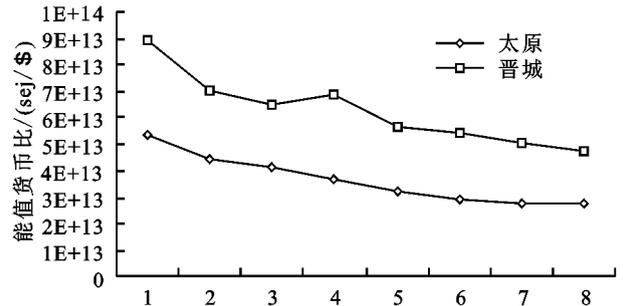


图3 2007—2014年太原市和晋城市的能值货币比对比

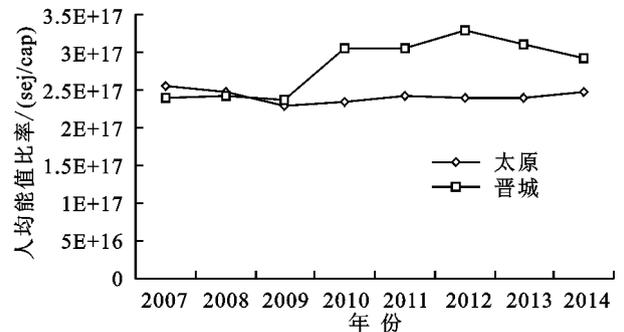


图4 2007—2014年太原市和晋城市的人均能值福利对比

2.3 新陈代谢能值环境压力

城市新陈代谢的能值环境压力包括环境负荷率和能值废弃率两个指标，对太原市和晋城市十年间环境负荷率的研究显示，两地城市代谢系统的不可再生资源能值压力呈现波动上升趋势，且晋城市环境负荷率高于太原市，晋城市代谢能值环境负荷率较高，晋城市代谢系统的环境负荷率由2007年的0.3501上升至2014年的0.5901。随着太原市进出口能值比例，

尤其是进口商品能值的快速增长,环境负荷率也不断攀升,2007—2014年,太原城市代谢系统的环境负荷率由2007年的0.2363上升至2014年的0.2717(图5),以上结果说明由进口能值和不可再生资源使用所引起的晋城城市代谢系统环境负担较太原市压力偏大,产业结构调整和节能减排的潜力巨大。环境负荷率测度结果不同的是,由于可再生资源能值的下降和废弃物能值的逐渐增加,太原的能值废弃率逐年提高,由2007年的0.1519上升为2014年的0.2646,与之相反,晋城市可再生资源能值逐年上升而废弃物能值逐年减少,从而晋城市的能值废弃率逐年降低,2007—2014年能值废弃率由1.1155下降到0.9618(图6),因而从城市的发展过程来看,太原城市产业高速发展的废弃物能值压力较大,绿色城市转型导向下的节能减排等环境管制任务迫切,而晋城市通过整合煤炭资源,发展循环经济,尽管能值废弃率本底值较高,但城市新陈代谢的可更新能力呈现良性发展。

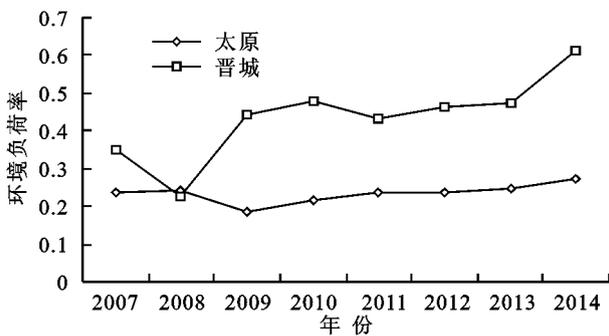


图5 2007—2014年太原市和晋城市的环境负荷率对比

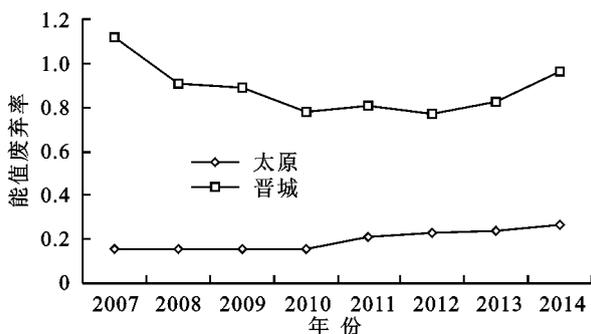


图6 2007—2014年太原市和晋城市的能值废弃率对比

2.4 新陈代谢系统产出效率

城市新陈代谢系统产出效率指标反映的是代谢系统资源能源投入产出的效率,包括能值产出率和能值可持续性指数。能值产出率是衡量代谢系统产出贡献大小的指标,其值越高,表明系统资源产出能值越高,即系统的生产效率越高。2007—2014年,太原和晋城的能值产出率都逐年下降,表明区域生产效率正在降低,能源利用结构不尽合理,有待优化。2007—2014年晋城的能值产出率高于太原(图7),表明在城市经济社会代谢过程中晋城市资源运用的效

率高于太原市。能值可持续性指标表明单位能值环境压力的产出效率,近10a来太原市和晋城市的ESI总体上呈不断下降趋势,到2014年分别达到27.81,12.12,整体上晋城市和太原市城市新陈代谢系统的自组织能力和可持续性持续下降,2007—2008年晋城市的ESI值高于太原市,2009—2014年太原市的ESI高于晋城市(图8),说明晋城市作为传统的资源型城市,相对于省会城市太原市,近年来对进口能值需求显著上升,不可再生资源能值减少,环境负荷率不断攀升,不可再生资源过度的开发和浪费,导致的结果就是长期的可持续发展竞争优势逐渐下降。而太原市在环境压力下的社会效益虽大于晋城,长远尺度上相对具有竞争优势,但由于输入能值远大于输出能值,太原市的可持续性指数逐年下降。

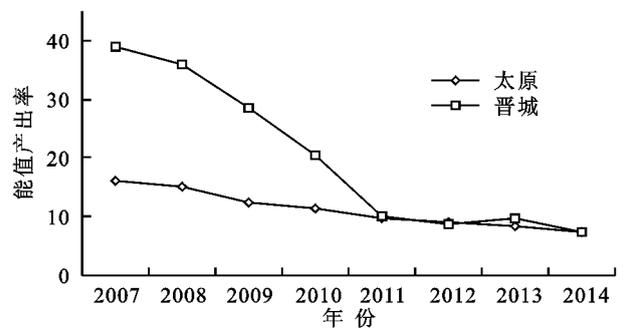


图7 2007—2014年太原市和晋城市的能值产出率对比

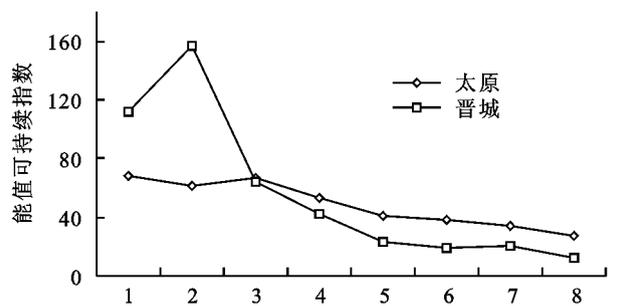


图8 2007—2014年太原市和晋城市的能值可持续性指数对比

3 结论与讨论

本文以 Odum 能值分析为理论支撑,通过定义若干个基于能值流的指数,表征和度量了城市代谢系统的运行特征和发展的可持续性。作为案例研究,计算和图解了资源型城市太原市和晋城市2007—2014年城市代谢的4项能值指数。结果表明:

(1) 2007年以来,随着社会经济的发展,晋城市的城市代谢总能值不断呈上升趋势,能值外向度2014年较之2007年增长近5倍,能值货币比下降,人均能值福利提高,环境负荷率加大,能值废弃率和系统产出率总体降低,与晋城市相比,太原市的城市代谢总能值也呈增长趋势且高于晋城市,在此期间,

能值废弃率和环境负荷率增加,代谢强度降低,同时,代谢系统能值可持续指标和能值产出率降低。

(2) 2007—2014年,太原市和晋城市代谢系统总能值增长较大,从能值来源指标方面来看,晋城市主要源于对不可更新能源的消耗,在新陈代谢系统构成中,非可再生资源能值占系统能值总量的比例较高,并呈现出非可再生资源能值导向下的资源型特征,虽然晋城市的自然资源非常丰富,但由于不可更新能源的过度开发利用,使得自然的不可更新能源迅速减少,导致未来发展的可持续性差,因此,应优先替代资源能源发展,进一步拓宽服务业进出口发展。代谢压力加大主要源于晋城市经济活动所需的能值多直接来自于无需付费的不可再生环境资源,属于高资源消耗型经济生态模式,如果不适度控制本地资源消耗可能会造成资源枯竭危机的出现,所以理应合理规划资源开发与利用,完善调配机制。太原市在资源利用方面表现为利用率低下,能值货币比极低,代谢压力加大反映了太原市在工业化过程中所面临的环境挑战加剧,只有从改变现有的生产模式出发,逐步建立高效的、科学的、现代化的生产模式,提高资源利用率,才能达到持续发展的目的。近年来,太原市第三产业在城市经济系统中的地位不断提高,进出口贸易不断增长,因而城市代谢系统中进出口能值的比重不断提高,城市代谢系统的外向度亦增长迅速,进一步加强对资源的引进与利用,在城市新陈代谢改善计划中优化城市进出口服务结构,从而加强系统自组织能力的发挥。

(3) 能值分析方法将城市生态系统中各种物质能量都转换为统一的太阳能值,为城市新陈代谢系统开辟了定量分析研究的新思路,弥补了传统GDP评价的不足,但能值分析也并非完美,在应用能值转化率时,不同区域的能值转化率是否相同还需商榷,由于时间和精力限制,拟在接下来的研究中纳入更多的资源型城市,开展更广区域的对比研究。

参考文献:

[1] 刘耕源,杨志峰,陈彬. 基于能值分析方法的都市代谢过程: 案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5078-5089.

[2] Zhang Y, Yang Z, Li W. Analyses of urban ecosystem based on information entropy[J]. Ecological Modelling, 2006, 197(1/2): 1-12.

[3] Newcombe K, Aston A R. The Metabolism of a City: The Case of Hong Kong[J]. Ambio, 1978, 7(1): 3-15.

[4] Ascione M, Campanella L, Cherubini F, et al. Environmental driving forces of urban growth and development: An

emergy-based assessment of the city of Rome, Italy[J]. Landscape & Urban Planning, 2009, 93(3/4): 238-249.

[5] 蓝盛芳, 软佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[6] Huang S L, Hsu W L. Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction[J]. Landscape & Urban Planning, 2003, 63(2): 61-74.

[7] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: Emergy synthesis versus material flow analysis [J]. Resources Conservation & Recycling, 2006, 48(2): 166-196.

[8] 严茂超. 西藏生态经济系统的能值分析与可持续发展研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(2): 117-125.

[9] 黄永斌, 董锁成, 李泽红. 基于能值分析的资源型城市新陈代谢水平评价: 以石嘴山市为例[J]. 资源科学, 2015, 37(8): 1621-1628.

[10] 李栋, 刘晶茹, 王如松. 城市生态系统代谢分析方法与评价指标研究进展[J]. 生态经济, 2008(6): 35-39.

[11] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making [J]. Child Development, 1996, 42(4): 1187-201.

[12] Odum H T, Brown M T, Brandt-Williams S. Handbook of emergy evaluation a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios Folio # 1 introduction and global budget[M]. Center for Environmental Policy, University of Florida; Gainesville, F L, USA, 2000.

[13] Ascione M, Campanella L, Cherubini F, et al. Environmental driving forces of urban growth and development: An emergy-based assessment of the city of Rome, Italy[J]. Landscape & Urban Planning, 2009, 93(3/4): 238-249.

[14] Huang S L, Hsu W L. Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction[J]. Landscape & Urban Planning, 2003, 63(2): 61-74.

[15] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4): 321-334.

[16] 宋涛, 蔡建明, 倪攀, 等. 基于能值理论的中国城市新陈代谢[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1085-1092.

[17] 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.

[18] Bakshi B R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering[J]. Computers & Chemical Engineering, 2002, 26(2): 269-282.

[19] 吴玉琴, 严茂超. 广州城市代谢效率的模拟分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1555-1562.