

DOI: 10.5846/stxb201809031881

陈伟,耿涌,黄斌斌,钟绍卓,高子彦,吴非,尤炜,宋晓倩.西部欠发达地区生态经济系统的能值分析——以青海省海西蒙古族藏族自治州为例.生态学报,2019,39(21): - .

Chen W, Geng Y, Huang B B, Zhong S Z, Gao Z Y, Wu F, You W, Song X Q. Emergy accounting of a western underdeveloped eco-economic system: A case study of Haixi in Qinghai. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

西部欠发达地区生态经济系统的能值分析 ——以青海省海西蒙古族藏族自治州为例

陈伟¹, 耿涌^{1,2,3,*}, 黄斌斌⁴, 钟绍卓¹, 高子彦⁵, 吴非¹, 尤炜¹, 宋晓倩²

1 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240

2 上海交通大学城市治理研究院, 上海 200030

3 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092

4 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

5 上海交通大学中英国际低碳学院, 上海 200240

摘要:青海省海西蒙古族藏族自治州(简称海西州)生态环境脆弱,快速发展的工业活动对当地生态环境造成严重破坏。海西州地处青藏高原东北部,是我国重要的生态安全屏障之一,在全国生态建设中处于特殊地位。能值分析法是一种基于热力学理论的环境核算方法。本研究利用能值分析法对海西州生态经济系统运行现状进行评估;并应用能值指标评价海西州生态经济系统的可持续发展水平;最后通过对能值指标的时间序列分析揭示海西州生态经济系统的发展趋势,以期在海西州生态经济系统的可持续发展提供参考依据。研究表明,2016年支撑海西州生态经济系统运行的总能值投入量为 6.69×10^{24} sej,是2010年总能值投入量的1.94倍。在2010—2016年的七年内,不可更新资源的能值投入占当年总能值投入量的比例均超过90%,而可更新资源能值投入量与从系统外输入到海西州的能值量占比均较低。基于能值的指标分析显示:海西州的人均能值使用量、能值密度、能值货币比率、环境负载率分别从2010年的 8.84×10^{18} sej/人、 1.15×10^{13} sej/m²、 3.05×10^{14} sej/US \$、103.02增加到2016年的 1.65×10^{19} sej/人、 2.22×10^{13} sej/m²、 9.12×10^{14} sej/US \$、213.47;而相应的能值产出率、能值可持续发展指数则分别从2010年的 2.66×10^3 和25.84降低到2016年的 1.23×10^3 和5.74。研究表明虽然海西州经济得到发展、人民生活质量得到提高,而经济发展对当地不可再生资源依赖较大,给环境造成的压力不断增加。为从长远角度实现海西州的可持续发展,亟需转变经济发展方式,降低对不可更新能源的过度开发。此外,研究结果显示,海西州的能值交换率小于1,这说明研究时间范围内,海西州在对外贸易过程中处于不利地位,因此需增加单位产品的附加值以促进能值流的合理流动。

关键词:能值分析;能值指标;生态经济系统;可持续性评估;海西州

Emergy accounting of a western underdeveloped eco-economic system: A case study of Haixi in Qinghai

CHEN Wei¹, GENG Yong^{1,2,3,*}, HUANG Binbin⁴, ZHONG Shaozhuo¹, GAO Ziyang⁵, WU Fei¹, YOU Wei¹, SONG Xiaoqian²

1 School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 China Institute of Urban Governance, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

3 Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China

4 Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

5 China-UK Low carbon College, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

基金项目:国家自然科学基金重大项目(71690241);青海省千人计划;上海同济高廷耀环保科技发展基金会资助项目

收稿日期:2018-09-03; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ygeng@sjtu.edu.cn

Abstract: Haixi Mongol and Tibetan Autonomous Prefecture (abbreviated as Haixi) is characterized by ecological fragility. Rapid industrial activities have substantial contributions to Haixi's economy, while bringing huge damage to its ecological environment. Located in the northeast of the Tibetan Plateau, Haixi is one of the most important ecological safety barriers of China and contributes significantly to China's national ecological construction. Based on thermodynamics, emergy synthesis is a useful method applied for environmental accounting. In this study, a systematic study on Haixi's eco-economic system was performed by using emergy synthesis to provide a holistic picture of its current performance. Emergy-based indicators were also adopted to evaluate the sustainability of Haixi's eco-economic system. In addition, temporal analysis of the emergy-based indicators was conducted to provide the historical trend of the performance of Haixi's eco-economic system. The results showed that the total emergy use for supporting Haixi's economy in 2016 was 6.69×10^{24} sej, which was 1.94 times that of the total emergy used to support Haixi's economy in 2010. The results also showed that the emergy in terms of local nonrenewable resources accounted for more than 90% of the total emergy use for supporting Haixi from 2010 to 2016, whereas the proportion of renewable resources and resources from outside were small. In addition, emergy use per person, emergy density, ratio of emergy to money, and environmental loading ratio increased from 8.84×10^{18} sej/person, 1.15×10^{13} sej/m², 3.05×10^{14} sej/US \$, 103.02 in 2010 to 1.65×10^{19} sej/person, 2.22×10^{13} sej/m², 9.12×10^{14} sej/US \$, 213.47 in 2016, respectively. Meanwhile, emergy yield ratio and the emergy-based sustainability index decreased from 2.66×10^3 and 25.84 in 2010 to 1.23×10^3 and 5.74 in 2016, respectively. The results obtained from this study indicate that although great progress has been made in the Haixi's economy and local people's living, the development of economy largely depends on local nonrenewable resources and present increasing pressure on the local environment. Thus, it is urgent to explore ways to reduce the overexploitation of nonrenewable resources and to promote Haixi's long-term sustainability development. In addition, results obtained from this study indicate that the emergy exchange ratio of Haixi is less than 1. This result shows that Haixi experienced disadvantages during its trade with other regions from 2010 to 2016. To promote rational exchange of emergy flows, it is important to increase the additional value of Haixi's products.

Key Words: Emergy accounting; emergy-based indicators; eco-economic system; sustainability evaluation; Haixi

青海省海西蒙古族藏族自治州(简称海西州)地处中国西北部,具有丰富的自然资源,是我国重要的生态屏障,在全国生态文明建设中具有特殊的地位^[1]。随着西部大开发、西气东输、青藏铁路建设等项目的实施,海西州经济社会步入快速发展时期。与此同时,海西州的生态环境也遭到不同程度的破坏,环境问题(如冰川融化、草地退化等)逐渐显现。基础设施和生态环境是西部地区最薄弱的方面,也是长期以来制约西部发展的瓶颈。海西州虽然有丰富的矿产资源,但其生态基础比较薄弱,且具有脆弱性和不稳定性^[2]。因此,实现区域经济与生态的协调可持续发展是海西州经济发展亟待解决的问题。

目前有多种用于生态经济系统评价的方法,比如能值分析法、物质流分析法及生态足迹法等。物质流分析法与生态足迹法都很难揭示社会经济系统的环境完整性和资源利用情况,且不能合理地评价生态系统对当地经济发展的贡献^[3-4]。能值理论是著名生态学家 Odum 于 20 世纪 80 年代提出,可用于定量评估生态经济系统绩效的理论体系^[5]。能值分析法通过太阳能值将能量流、物质流以及货币流转换为同一量化标准,定量分析资源环境与经济活动的真实价值及其联系^[6-7],评价自然资源对生态经济活动的贡献^[8]。该方法克服了传统能量分析中不同物质和能量间不具比较性和可加性等缺陷^[9],为认识自然资源与人类活动的关系提供了新的视角,是连接生态学与经济学的桥梁^[6,10]。运用能值概念和理论,可以对各种资源进行评估,预测环境资源对经济的贡献及影响,评价环境和经济发展前景,从而为促进生态经济系统可持续发展提供科学依据^[7]。目前,能值分析法已经被广泛的应用到生态经济系统的评估及可持续性评价中,并取得了丰硕的研究成果^[5,11]。Li 和 Brown^[12]在 2017 年对蒙古国生态经济系统进行了能值分析,研究结果表明蒙古国的人均能值使用量低于全球平均水平。Yang 等人^[13]利用能值分析法评估了中国经济运行的能源及资源消耗,研究指

出中国经济的发展严重依赖于当地不可再生资源的消耗。Lou 和 Ulgiati^[14]采用能值分析法评估中国生态经济系统的可持续性,其研究结果表明中国在 1978—2009 年期间内可持续发展水平呈下降趋势。Chen 等人^[4,15]对省级生态经济系统进行能值分析并提出促进区域可持续发展的对策建议。此外还有关于京津冀地区^[16-18]、贵州^[8]、宁夏^[19]、辽宁^[20]、黄河三角洲^[21]、沈阳^[22]、包头^[23]、澳门^[24]等地区的能值分析研究。以上研究的开展均为本研究提供良好的参照。然而到目前为止,尚没有针对海西州生态经济系统的能值分析及可持续性评价研究。

笔者利用能值分析法量化维持海西州生态经济系统运行的能值投入;并借助基于能值的指标评估海西州的可持续发展水平;此外,研究还进行了能值指标的时间序列分析,以期揭示海西州生态经济系统的历史演变过程,为促进海西州经济与资源环境的协调发展提供科学依据。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域概况

海西州地处中国青海省的西部,因位于青海湖的西部而得名。海西州位于北纬 35°01′—39°20′,东经 90°06′—99°42′,总面积为 30.09 万 km²,占青海省总面积的 41.7%,其州域主体柴达木盆地的面积为 25.6 万 km²,占全州面积的 85.28%。海西州平均海拔在 3000 m 左右,气候独特,四季不分明,太阳辐射强,昼夜温差大,常年干旱、多风、少雨,属于典型的高原大陆性气候^[25]。2016 年海西州年度降水量为 248.9 mm,平均风速 1.8 m/s,全年日照时数 2916.4 h,年平均气温 5.5 ℃,其中一月份平均气温最低(-10.3 ℃),八月份平均气温最高(19.7 ℃)^[25]。

2016 年底,海西州年末总人口数为 40.43 万人,国内生产总值 486.96 亿元,其中第一产业、第二产业及第三产业占比分别为 5.77%(28.09 亿元)、67.08%(326.67 亿元)和 27.15%(132.20 亿元)。海西州矿产资源丰富,其中原盐、钾、镁、锂、锑、石棉及芒硝等矿藏储量居全国首位,矿产资源开发是海西州重要的经济支柱^[26]。同年末,全州有自然保护区 5 个,面积 96.9 万 hm²;森林面积 137.3 万 hm²,森林覆盖率 3.5%;湿地面积 351.2 万 hm²,其中自然湿地面积 342.3 万 hm²^[25]。

1.2 研究方法

Odum^[27]将能值定义为产品或劳务形成过程中所需的直接和间接的有效能。任何形式的能量均来源于太阳能,因此实际应用中常以太阳能值为基准对与研究系统相关的、不同等级能量的真实价值及其贡献量进行量化评估,单位为太阳能焦耳(Solar emjoules, sej)^[7,27]。能值分析中通常借助单位能值价值(Unit Emergy Value, UEV)将不同类别的流(能量、质量和货币等)转化为同一量化单位(太阳能值),进而综合分析与研究系统相关的各种流,从而定量分析所研究系统的结构功能特征^[7,27]。基本公式如下所示:

$$U = \sum_{i=1}^{i=n} U_i = \sum_{i=1}^{i=n} \text{UEV}_i \times f_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: U 是投入到系统的总能值,单位 sej; U_i 代表流 i 的能值量,单位 sej; i 为进入到该系统的流(物质流、能量流、货币流等); f_i 代表进入到系统的流 i 的量; UEV_i 代表每单位 i 的能值量,单位为 sej/unit;

根据公式(1),所有与研究系统有关的物质流、能量流以及服务流都可以进行量化。根据 Odum 创立的能值分析理论^[27],海西州生态经济系统可持续水平评价可分成以下 4 个步骤有序进行:

- (1) 绘制海西州生态经济系统核算的能值系统图,如图 1;
- (2) 识别海西州生态经济系统相关的主要物质流、能量流及货币流;
- (3) 对海西州生态经济系统相关的主要物质流、能量流及货币流进行归类,编制海西州生态经济系统能值分析表,进行海西州生态经济系统能值核算;
- (4) 量化基于能值的指标,以揭示海西州生态经济系统资源利用现状和可持续发展水平,并提出促进海西州生态经济系统良性循环和可持续发展的对策建议。

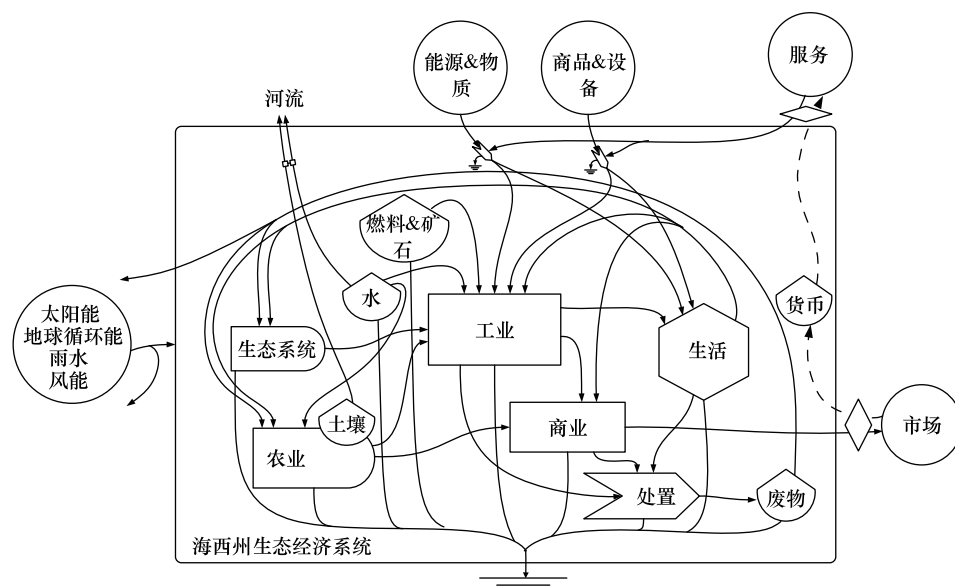


图1 海西州生态经济系统核算能值系统图

Fig.1 Emergy system diagram of Haixi's eco-economic system

此外, Brown 等人^[28]在 2016 年给出了新的能值基准(12.0×10^{24} seJ/yr), 并倡导在后续能值研究中采用此基准。笔者选取 12.0×10^{24} seJ/yr 作为本研究的能值基准, 其他不同基准条件下获取的单位能值价值(UEV)均通过系数进行转化, 如将以 15.83×10^{24} seJ/yr 为基准的 UEV 乘以系数 0.76 ($12.0 \div 15.83 = 0.76$) 转化为 12.0×10^{24} seJ/yr 为基准的 UEV^[29]。

1.3 数据来源

研究收集了海西州自然地理(面积、海拔、年均降雨量以及年均风速等数据)、社会经济等方面数据, 数据主要来源于青海省统计年鉴、海西州统计年鉴、政府报告、海西州国土资源局、海西州统计局以及海西州商务局等方面。研究选用 2016 年数据用于揭示海西州生态经济系统运行现状, 选用 2010 年—2016 年七年数据做时间序列分析以探究海西州经济系统运行历史特征及发展趋势。本文选取的 UEV 均来自国内外同行评议的文献, 具体见表 1。

2 结果与讨论

2.1 能值分析

表 2 给出了支撑海西州经济系统的主要能值投入, 包括可更新资源能值投入、不可更新资源能值投入和系统外的资源能值投入。结果表明, 2016 年海西州生态经济系统总能值投入量为 6.69×10^{24} sej, 是 2010 年总能值投入量的 1.94 倍。在 2010—2016 期间, 总能值投入量呈现出先减少后增加再减少再增加的波动, 其中当地不可再生资源的能值投入量呈现出同样的波动趋势, 由此可以看出当地不可再生资源的能值投入是支撑海西州经济系统运行的主要贡献者, 具体分析如下。

基于前期资料收集的基础, 对于可再生资源能值投入, 本研究主要是考虑太阳辐射、雨水化学能、雨水势能、风能、地球循环能以及水力发电。为了避免重复计算, 仅将可再生资源中能值量最大的一项计入评价体系^[33]。2016 年, 可再生资源能值投入量为 3.12×10^{22} sej, 不足 2016 年总能值投入量的 1%。在 2010—2016 年期间, 可再生资源能值投入量在 1.59×10^{22} sej 到 3.84×10^{22} sej 间变动, 总体上对支撑系统运行的总能值投入量的贡献较小。

表 1 能值分析基本数据 (2010—2016)
Table 1 Major flows supporting Haixi (2010—2016)

类别 Item	原始数据 Raw data							单位 Unit	单位能值价值 UEV _{update} (sej/unit)	单位能值价值参考文献 References for UEV
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016			
可更新资源 Renewable resources										
太阳能 Sunlight	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	J	1	Odum (1996) ^[27]
雨水化学能 Rain, chemical	2.36×10 ¹⁷	1.48×10 ¹⁷	2.73×10 ¹⁷	1.10×10 ¹⁷	1.69×10 ¹⁷	2.08×10 ¹⁷	2.22×10 ¹⁷	J	2.31×10 ⁴	Brown and Bardi (2001) ^[30]
雨水势能 Rain, geopotential	9.38×10 ¹⁷	5.86×10 ¹⁷	1.08×10 ¹⁸	4.38×10 ¹⁷	6.71×10 ¹⁷	8.24×10 ¹⁷	8.81×10 ¹⁷	J	3.54×10 ⁴	Brown and Bardi (2001) ^[30]
风能 Wind, kinetic energy	2.32×10 ¹⁷	2.32×10 ¹⁷	1.91×10 ¹⁷	2.32×10 ¹⁷	2.78×10 ¹⁷	2.78×10 ¹⁷	3.31×10 ¹⁷	J	1.90×10 ³	Brown and Bardi (2001) ^[30]
地球循环能 Geothermal heat	3.32×10 ¹⁷	3.32×10 ¹⁷	3.32×10 ¹⁷	3.32×10 ¹⁷	3.32×10 ¹⁷	3.32×10 ¹⁷	3.32×10 ¹⁷	J	4.37×10 ⁴	Brown and Bardi (2001) ^[30]
水力发电 Hydro power	2.54×10 ¹⁵	2.68×10 ¹⁵	2.32×10 ¹⁵	2.79×10 ¹⁵	2.86×10 ¹⁵	2.86×10 ¹⁵	3.04×10 ¹⁵	J	8.13×10 ⁴	Pang et al. (2014) ^[31]
当地不可更新自然资源 Indigenous nonrenewable resources										
表土层损失 Topsoil losses	6.74×10 ¹⁴	6.93×10 ¹⁴	6.98×10 ¹⁴	7.37×10 ¹⁴	7.44×10 ¹⁴	7.92×10 ¹⁴	8.12×10 ¹⁴	J	9.40×10 ⁴	Brown and Bardi (2001) ^[30]
天然气 Nature gas	4.79×10 ¹⁶	7.68×10 ¹⁶	9.33×10 ¹⁶	9.80×10 ¹⁶	8.73×10 ¹⁶	9.01×10 ¹⁶	9.86×10 ¹⁶	J	1.34×10 ⁵	Brown et al. (2011) ^[32]
煤炭 Coal	9.21×10 ¹⁶	8.66×10 ¹⁶	1.78×10 ¹⁷	2.38×10 ¹⁷	2.15×10 ¹⁷	2.60×10 ¹⁵	9.26×10 ¹⁶	J	7.67×10 ⁴	Brown et al. (2011) ^[32]
石油 Oil	5.22×10 ¹⁶	6.74×10 ¹⁶	6.04×10 ¹⁶	8.97×10 ¹⁶	3.06×10 ¹⁶	6.57×10 ¹⁶	6.14×10 ¹⁶	J	1.17×10 ⁵	Brown et al. (2011) ^[32]
非金属矿产 ^a Nonmetallic minerals	3.24×10 ¹³	3.94×10 ¹³	4.07×10 ¹³	4.84×10 ¹³	5.72×10 ¹³	6.13×10 ¹³	6.55×10 ¹³	g	权重值 Weighted value	本研究 This study
金属矿产 ^a Metal minerals	7.18×10 ¹²	7.57×10 ¹²	8.02×10 ¹²	1.13×10 ¹³	9.08×10 ¹²	8.67×10 ¹²	1.14×10 ¹³	g	权重值 Weighted value	本研究 This study
进口及调入资源 Import and from outside										
能源 Energy	5.76×10 ¹⁵	6.67×10 ¹⁵	5.56×10 ¹⁴	1.13×10 ¹³	1.29×10 ¹³	1.03×10 ¹⁶	6.68×10 ¹⁶	J	权重值 Weighted value	本研究 This study
服务 Services associated to imports	4.06×10 ⁷	3.96×10 ⁷	1.35×10 ⁸	6.90×10 ⁷	7.41×10 ⁷	3.60×10 ⁷	9.26×10 ⁶	US \$	能值货币比率 _{全球}	Lou and Ulgiati (2013) ^[14]
出口及调出资源 Export and to outside										
能源 Energy	4.93×10 ¹⁷	6.24×10 ¹⁷	5.80×10 ¹⁷	6.31×10 ¹⁷	4.39×10 ¹⁷	3.16×10 ¹⁷	2.36×10 ¹⁷	J	权重值 Weighted value	本研究 This study
服务 Services associated to exports	1.71×10 ⁶	2.67×10 ⁶	4.24×10 ⁶	5.58×10 ⁶	1.26×10 ⁷	1.07×10 ⁷	2.96×10 ⁷	US \$		本研究 This study
旅游 Tourism	8.86×10 ⁷	1.39×10 ⁸	2.20×10 ⁸	3.04×10 ⁸	4.07×10 ⁸	5.76×10 ⁸	8.73×10 ⁸	US \$		本研究 This study

海西州 2016 年当地不可再生资源能值投入量为 6.65×10^{24} sej, 其中金属矿产资源能值投入起主要贡献 (6.47×10^{24} sej)。由表 2 可以看出, 海西州 2010—2016 年的当地不可再生资源能值投入占总能值投入量的 95% 以上, 是支撑海西州经济运行的主要贡献者。其中金属矿产资源的能值投入量最大, 表层土损失的能值量占总能值投入量的比例极低 (远小于 1%)。受金属矿产市场的影响, 研究期间内金属矿产资源产量不断波动, 该波动是导致总能值投入量波动的主要原因。

表 2 海西州能值分析表 (2010—2016)

Table 2 Major emery flows for supporting Haixi (2010—2016)

类别 Item	年份 Year							单位 Unit
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
可更新资源 Renewable resources								
太阳能 Sunlight	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	1.41×10 ²¹	sej
雨水化学能 Rain, chemical	5.46×10 ²¹	3.42×10 ²¹	6.32×10 ²¹	2.55×10 ²¹	3.91×10 ²¹	4.80×10 ²¹	5.13×10 ²¹	sej
雨水势能 Rain, geopotential	3.32×10 ²²	2.08×10 ²²	3.84×10 ²²	1.55×10 ²²	2.38×10 ²²	2.92×10 ²²	3.12×10 ²²	sej
风能 Wind, kinetic energy	4.41×10 ²⁰	4.41×10 ²⁰	3.63×10 ²⁰	4.41×10 ²⁰	5.29×10 ²⁰	5.29×10 ²⁰	6.28×10 ²⁰	sej
地球循环能 Geothermal heat	1.45×10 ²²	1.45×10 ²²	1.45×10 ²²	1.45×10 ²²	1.45×10 ²²	1.45×10 ²²	1.45×10 ²²	sej
水力发电 Hydro power	2.07×10 ²⁰	2.18×10 ²⁰	1.89×10 ²⁰	2.27×10 ²⁰	2.32×10 ²⁰	2.33×10 ²⁰	2.47×10 ²⁰	sej
可更新资源能值 Energy of renewable resources	3.32×10 ²²	2.08×10 ²²	3.84×10 ²²	1.59×10 ²²	2.38×10 ²²	2.92×10 ²²	3.12×10 ²²	sej
当地不可更新自然资源 Indigenous nonrenewable resources								
表土层损失 Topsoil losses	6.34×10 ¹⁹	6.51×10 ¹⁹	6.56×10 ¹⁹	6.93×10 ¹⁹	6.99×10 ¹⁹	7.44×10 ¹⁹	7.63×10 ¹⁹	sej
天然气 Nature gas	6.43×10 ²¹	1.03×10 ²²	1.25×10 ²²	1.32×10 ²²	1.17×10 ²²	1.21×10 ²²	1.32×10 ²²	sej
煤炭 Coal	7.06×10 ²¹	6.64×10 ²¹	1.37×10 ²²	1.83×10 ²²	1.65×10 ²²	2.00×10 ²⁰	7.10×10 ²¹	sej
石油 Oil	6.10×10 ²¹	7.88×10 ²¹	7.06×10 ²¹	1.05×10 ²²	3.58×10 ²¹	7.68×10 ²¹	7.18×10 ²¹	sej
非金属矿产 Nonmetallic minerals	7.65×10 ²²	9.24×10 ²²	9.52×10 ²²	1.13×10 ²³	1.35×10 ²³	1.45×10 ²³	1.55×10 ²³	sej
金属矿产 Metal minerals	3.32×10 ²⁴	2.60×10 ²⁴	2.28×10 ²⁴	4.93×10 ²⁴	4.30×10 ²⁴	4.40×10 ²⁴	6.47×10 ²⁴	sej
小计 Sum	3.42×10 ²⁴	2.71×10 ²⁴	2.41×10 ²⁴	5.09×10 ²⁴	4.46×10 ²⁴	4.56×10 ²⁴	6.65×10 ²⁴	sej
进口及调入资源 Import and from outside								
能源 Energy	1.23×10 ²¹	8.98×10 ²⁰	5.71×10 ¹⁹	1.32×10 ¹⁸	1.51×10 ¹⁸	1.59×10 ²¹	5.45×10 ²¹	sej
进口相关服务 Services associated to imports	6.39×10 ¹⁹	6.15×10 ¹⁹	2.06×10 ²⁰	1.04×10 ²⁰	1.10×10 ²⁰	5.29×10 ¹⁹	1.34×10 ¹⁹	sej
小计 Sum	1.30×10 ²¹	9.60×10 ²⁰	2.64×10 ²⁰	1.06×10 ²⁰	1.12×10 ²⁰	1.64×10 ²¹	5.46×10 ²¹	sej
总能值投入量 Total emery use	3.45×10 ²⁴	2.74×10 ²⁴	2.45×10 ²⁴	5.10×10 ²⁴	4.49×10 ²⁴	4.59×10 ²⁴	6.69×10 ²⁴	sej
出口及调出资源 Export and to outside								
能源 Energy	5.13×10 ²²	6.15×10 ²²	5.73×10 ²²	6.11×10 ²²	5.05×10 ²²	3.73×10 ²²	3.08×10 ²²	sej
出口相关服务 Services associated to exports	5.22×10 ²⁰	9.80×10 ²⁰	1.15×10 ²¹	2.89×10 ²¹	6.78×10 ²¹	6.97×10 ²¹	2.70×10 ²²	sej
旅游 Tourism	2.70×10 ²²	5.09×10 ²²	5.98×10 ²²	1.58×10 ²³	2.19×10 ²³	3.74×10 ²³	7.96×10 ²³	sej
小计 Sum	7.89×10 ²²	1.13×10 ²³	1.18×10 ²³	2.22×10 ²³	2.76×10 ²³	4.19×10 ²³	8.54×10 ²³	sej

进口及调入资源是指从海西州外进入到海西州内的商品。通常, 商品的生产及流通过程都有服务与货币的投入。因此, 研究将与进口及调入商品相关的服务也考虑在内。Chen 等人^[15]的研究中指出, 进口及调入资源能值投入对青海省生态经济系统运行总能值投入的贡献较低, 且化石燃料 (进口及调入) 的能值投入是青海省进口及调入资源能值投入的主要来源。基于调研所能获取的数据, 本研究中进口及调入资源的能值投入仅考虑了能源类的能值投入。与进口及调入资源相对, 出口及调出资源不直接被海西州使用, 得到的资金回流间接支持海西州发展。因此能值理论中, 出口及调出的能值不计算在总能值投入中^[27]。2016 年进口及调入资源对海西州经济系统的贡献量为 5.46×10^{21} sej, 是 2010 年的 4.20 倍; 海西州出口及调出的能值也呈上升趋势, 由 2010 年 7.89×10^{22} sej 增长至 2016 年的 8.54×10^{23} sej。这些结果表明海西州经济对外交流在不断的加强。

虽然旅游活动发生在研究区域内, 但该活动以向外提供服务而获取货币的形式支撑研究区域经济系统的

运行,因此研究中将旅游纳入到出口类别^[34]。海西州 2016 年因旅游服务输出的能值为 7.96×10^{23} sej, 是 2010 年旅游服务输出能值的 29.48 倍。2010—2016 年间旅游能值输出逐年增加,但海西州旅游收入以国内旅游收入为主(外汇收入较低),这除了与海西州处于内陆地区有关外,与海西州人才相对匮乏、基础设施落后也有密不可分的关系。因此,借助生态文明建设的东风优先发展生态旅游,完善当地基础设施建设、加强整个旅游行业的能力建设,对海西州经济绿色低碳发展尤为重要。

2.2 能值指标时间序列分析

通过能值分析可将汇入到生态经济系统的各种流(物质、能量等)转换为同一的能值尺度,解决了不同类别的流因能质的差异而难以进行比较的问题,进而可以定量的分析生态经济系统的结构和功能特征;通过对能值指标的时间序列分析,可以探究在经济发展过程中某一国家或地区生态经济系统的可持续发展趋势,进而为促进可持续发展提供科学依据。

2016 年支撑海西州生态经济系统运行的能值投入量为 6.69×10^{24} sej,除以当年海西州国内生产总值 486.96 亿元,海西州 2016 年的能值货币比率为 1.37×10^{14} sej/¥ (9.12×10^{14} sej/US \$)。相类似的,海西州 2016 年的人均能值使用量与能值密度分别为 1.65×10^{19} sej/人和 2.22×10^{13} sej/m²。

表 3 能值指标时间序列分析

Table 3 Time series analysis of emergy-based indicators

能值指标 Emergy-based indicators	单位 Unit	年份 Year						
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
总能值投入 Total emergy use	sej	3.45×10^{24}	2.74×10^{24}	2.45×10^{24}	5.10×10^{24}	4.49×10^{24}	4.59×10^{24}	6.69×10^{24}
能值货币比率 Ratio of emergy use to money	sej/¥	4.50×10^{13}	5.68×10^{13}	4.30×10^{13}	8.37×10^{13}	8.76×10^{13}	1.04×10^{14}	1.37×10^{14}
能值货币比率 Ratio of emergy use to money	sej/US \$	3.05×10^{14}	3.67×10^{14}	2.71×10^{14}	5.19×10^{14}	5.38×10^{14}	6.50×10^{14}	9.12×10^{14}
人均使用能值 Emery use per person	sej/person	8.84×10^{18}	6.91×10^{18}	6.08×10^{18}	1.25×10^{19}	1.09×10^{19}	1.14×10^{19}	1.65×10^{19}
能值密度 Emery density	sej/m ²	1.15×10^{13}	9.09×10^{12}	8.15×10^{12}	1.70×10^{13}	1.49×10^{13}	1.53×10^{13}	2.22×10^{13}
能值产出率 Emery yield ratio		2.66×10^3	2.85×10^3	9.30×10^3	4.83×10^4	4.01×10^4	2.79×10^3	1.23×10^3
环境负载率 Environmental loading ratio		103.02	130.81	62.87	319.77	187.86	156.44	213.47
能值可持续发展指数 Emery sustainability index		25.84	21.79	148.00	150.97	213.46	17.86	5.74

表 3 给出了海西州能值指标的时间序列分析,以更好的揭示海西州资源利用结构与经济运行现状。人均能值使用量是一个国家或地区的人均能值利用量,是衡量人们生存水平和生活质量的指标;能值密度为一个国家或地区的能值投入量与其相应的面积之比,可反应所评价地区的经济发展强度。通过表 3 可以看出,研究时间范围内,海西州的人均能值使用量和能值密度在波动中增长。其中,维持经济系统的能值投入从 2010 年的 3.45×10^{24} sej 增长到 2016 年的 6.69×10^{24} sej;相应的人均能值使用量从 2010 年的 8.84×10^{18} sej/人增加到 2016 年的 1.65×10^{19} sej/人;能值密度则从 2010 年的 1.15×10^{13} sej/m² 增加到 2016 年的 2.22×10^{13} sej/m²。该结果表明,海西州的居民 2016 年的生活水平较 2010 年得到提高。

能值货币比率是支撑国家或地区生态经济系统运行的能值投入量与该国家或地区国内生产总值之比,其可反应单位货币可购买的能值财富量。本研究的结果显示,海西州的能值货币比率从 2010 年的 3.05×10^{14} sej/US \$ 增加到 2016 年的 9.12×10^{14} sej/US \$ (表 3)。前人的研究表明,中国整体水平的能值货币比率高于世界平均水平^[14],而海西州的能值货币比率比又高于中国平均水平。一般而言,欠发达的地区能值货币比率要相对高于较其发达的地区,这主要是因为欠发达地区更多的应用没有经过货币转化的资源(原材料作为商品直接输出)。因此,为促进区域可持续发展,进行原材料深加工以提高单位产品能值量是非常必要的。

能值产出率为支撑系统运行的总能值与经济社会投入能值之比,是衡量所研究系统生产效率的指标;环境负载率为投入到系统的不可更新资源能值量与可更新资源能值量之比;能值可持续发展指数为所研究系统的能值产出率与环境负载率之比。2016 年海西州环境负载率为 213.47,能值产出率为 1.23×10^3 ,相应的可持续发展指数为 5.74。由表 3 可以看出,海西州 2014 年的可持续发展指数最高(213.46),同年的能值产出率及

环境负载率分别为 4.01×10^4 和 187.86。能值可持续发展指数大于 10 是经济欠发达的表征,在 1—10 之间表明经济系统富有活力和发展力^[35]。研究结果表明在研究时间范围内,海西州对资源的开发利用程度逐渐增强,经济有了一定程度的发展。然而海西州经济发展过度依赖于当地不可更新资源,在经济增长过程中海西州生态系统承受着越来越大的环境压力。若长期处于较高的环境负载下,生态系统将产生不可逆转的功能衰退,海西州作为全国重要的生态安全屏障,其经济健康可持续发展至关重要。因此,在长期发展过程中,应转变发展模式,杜绝资源消耗型发展路径。

2.3 能值指标比较研究

为进一步对海西州生态经济系统进行分析,揭示海西州在青海省的经济地位,笔者将本研究的结果与青海省相应能值指标进行对比分析,结果如表 4 所示。海西州的人均能值使用量和能值密度均高于青海省相应指标,该结果表明从能值的角度海西州居民的生活水平高于青海省平均水平。与此同时,海西州的能值产出率与环境负载率高于青海省的能值产出率与环境负载率,该结果表明虽然海西州生态经济系统的生产效率较青海省高,但对海西州产生的环境负荷相对较大。

相比高附加值的商品,未加工原材料的直接输出产生的经济效益低且伴随着能值的流失^[36]。由表 4 可以看出,2012 年海西州国内生产总值占青海省国内生产总值的 30%,当年支撑海西州生态经济系统运行的能值投入占青海省能值投入的 77%;而 2015 年海西州国内生产总值占青海省国内生产总值的 18%,当年支撑海西州生态经济系统运行的能值投入则占青海省能值投入的 89%,从能值分析的角度,海西州对青海省经济发展的贡献要远大于货币层面的价值贡献。造成这一结果的主要原因是青海省和海西州的生态经济系统运行主要依赖于当地不可再生原材料的投入。其中,青海省在 2012 与 2015 年当地金属矿产资源对经济系统的贡献量分别为 2.87×10^{24} sej 和 4.80×10^{24} sej,占当年总能值投入的 90%与 94%^[15],而该部分矿产资源大部分来自于海西州,例如铁、锰、铅、锡、金、锂等。

表 4 能值指标对比

Table 4 Comparison of emergy-based indicators

	2012		2015		单位 Unit
	青海	海西	青海	海西	
总能值投入 Total emergy use	3.18×10^{24}	2.45×10^{24}	5.13×10^{24}	4.59×10^{24}	sej
国内生产总值 Gross domestic product	1.89×10^{11}	5.70×10^{10}	2.42×10^{11}	4.40×10^{10}	¥
美元/人民币 US \$ / ¥	6.31	6.31	6.23	6.23	US \$ / ¥
人口 Population	5.73×10^6	4.03×10^5	5.88×10^6	4.02×10^5	人
人均能值使用量 Emery per person	5.55×10^{17}	6.08×10^{18}	8.72×10^{17}	1.14×10^{19}	sej/人
能值货币比率 Ratio of emery to money	1.06×10^{14}	2.71×10^{14}	1.32×10^{14}	6.50×10^{14}	sej/US \$
能值密度 Emery density	4.40×10^{12}	8.15×10^{12}	7.11×10^{12}	1.53×10^{13}	sej/m ²
能值产出率 Emery yield ratio	68.17	9.30×10^3	164.10	2.79×10^3	
环境负载率 Environmental loading ratio	27.47	62.87	57.99	156.44	

前人^[37]的研究表明青海省的能值货币比率远大于全国平均水平,青海省在与其他省份进行贸易的过程中,存在着严重的资源流失。由表 4 可以看出,海西州的能值货币比率高于青海省能值货币比率,即从能值的角度讲,海西州在进行对外贸易时存在严重的资源流失。

海西州从 2010 年到 2016 年七年间进口贸易额与出口贸易额的比率均小于 1,从货币的角度看海西州在贸易中获利;然而在此期间,海西州进口能值量与出口能值量的比率(能值交换率)同样小于 1(表 2),说明海西州在对外贸易过程中存在能值量(财富)的损失。图 2 以海西州与云南省贸易为例进行说明,直观地表达出海西州对外贸易时的价值损失。云南省能值货币比率在 2012 年为 8.16×10^{12} sej/US \$^[4],海西州该年的能值货币比率为 2.71×10^{14} sej/US \$,海西州的能值货币比率是云南省能值货币比率的 33 倍。这种情况下,同样 100 美元,云南省可从海西州购得 2.71×10^{16} sej,而海西州仅能从云南省购得 8.16×10^{14} sej,即云南省购得

的真实价值量是海西州购得真实价值量的 33 倍。因此,平衡贸易过程中的能值流对促进海西州经济健康稳健发展是至关重要的。

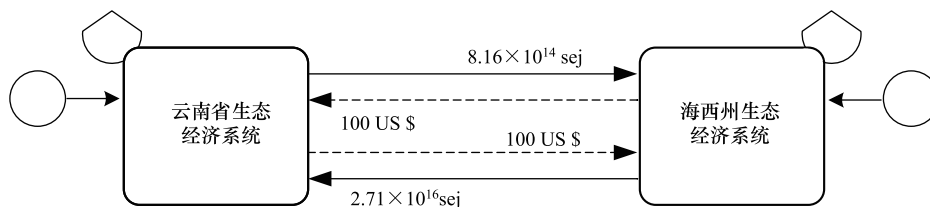


图 2 能值在贸易中体现的真正财富

Fig.2 Real wealth in solar emery exchange during trade

3 结论与建议

海西州矿产资源丰富,主要以石油、天然气、有色金属、盐化工等资源密集型产业为主导产业。本研究在收集海西州自然地理、社会经济等方面数据的基础上,利用能值分析法,构建海西州生态经济系统能值评估表以及海西州生态经济系统能值指标,以对支撑海西州生态经济系统运行的各种资源进行量化并评价其影响及贡献,进而分析海西州生态经济系统的运行特点;此外,依据能值指标的时间序列分析揭示海西州经济发展进程中可持续发展水平的历史趋势,以期为海西州生态经济系统的可持续发展提供参考。结果表明:

(1)2016 年支撑海西州生态经济系统运行的能值总量为 6.69×10^{24} sej,是 2010 年投入能值总量的 1.94 倍,且主要依赖于当地不可再生资源(占比 90%以上)。化石燃料消耗排放的二氧化碳加速全球变暖^[38],影响青海省生态环境(如冰川融化等)。海西州水力资源丰富,然而水力资源的能值投入相对支撑海西州运行的能值量极小,因此充分利用当地资源优势发展可再生资源非常必要。经济的发展对海西州生态环境造成的压力不断增加,且海西州存在环境保护基础设施建设滞后、总量减排工作形势严峻等问题,因此海西州需大力发展循环经济园区、提倡生态工业园区的建设,以提高资源利用效率,进而最大限度的降低经济活动对生态环境造成的不利影响,走经济绿色低碳发展路径。

(2)能值指标的时间序列分析表明,研究期间内海西州经济发展过度依赖当地不可再生资源,对生态环境造成的压力不断增加。海西州地处青藏高原,生态环境特殊,在全国生态建设中具有特殊地位。因此,在促进海西州经济发展过程中,应充分考虑当地生态环境的价值,完善生态服务补偿机制,多途径促进海西州经济发展。

(3)海西州在进行对外贸易过程中,存在严重的资源流失。因此需要积极的招商引资,引进先进的技术、设备、管理经验以及各类人才,改变原有的原材料输出与初级产品加工的输出格局,增加单位产品的附加值,以促进能值流的合理流动。这样既可以促进对外交流,也能缓解当地资源开发利用对生态环境造成的压力,是促进海西州生态经济长久可持续发展的有效途径。

参考文献(References):

- [1] 海西环保. 海西:筑牢三江源生态安全屏障. [2018-11-02].http://www.qhepb.gov.cn/xwzx/xw/snxw/201709/t20170904_405882.html
- [2] 杜新波,秦静. 基于生态足迹的区域生态环境承载力评价——以青海省海西州为例. 资源与产业, 2010, 12(5): 56-60.
- [3] Viglia S, Civitillo D F, Cacciapuoti G, Ulgiati S. Indicators of environmental loading and sustainability of urban systems. An emery-based environmental footprint. Ecological Indicators, 2017, 94: 82-99.
- [4] Chen W, Zhong S Z, Geng Y, Chen Y H, Cui X W, Wu Q, et al. Emery based sustainability evaluation for Yunnan Province, China. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 1388-1397.
- [5] Chen W, Liu W J, Geng Y, Brown M T, Gao C X, Wu R. Recent progress on emery research: A bibliometric analysis. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1051-1060.

- [6] 彭建, 刘松, 吕婧. 区域可持续发展生态评估的能值分析研究进展与展望. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(5): 47-51.
- [7] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [8] 易定宏, 文礼章, 肖强, 胡聃, 李锋, 游芳. 基于能值理论的贵州省生态经济系统分析. 生态学报, 2010, 30(20): 5635-5645.
- [9] 王鹏, 刘小鹏, 姚晓艳, 陈晓, 孔福星. 基于能值分析的宁夏生态经济系统可持续发展评价. 生态经济, 2018, 34(1): 70-73.
- [10] 陆宏芳, 沈善瑞, 陈洁, 蓝盛芳. 生态经济系统的一种整合评价方法: 能值理论与分析方法. 生态环境, 2005, 14(1): 121-126.
- [11] 刘文婧, 耿涌, 田旭, 孙露, 高翠侠, 陈伟. 基于文献计量学及网络分析的能值研究综述. 中国农业大学学报, 2016, 21(10): 200-210.
- [12] Li H T, Brown M T. Emergy-based environmental accounting toward a sustainable Mongolia. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(10): 1227-1248.
- [13] Yang Z F, Jiang M M, Chen B, Zhou J B, Chen C Q, Li S C. Solar emergy evaluation for Chinese economy. *Energy Policy*, 2010, 38, 875-886.
- [14] Lou B, Ulgiati S. Identifying the environmental support and constraints to the Chinese economic growth—An application of the Emergy Accounting method. *Energy Policy*, 2013, 55: 217-233.
- [15] Chen W, Geng Y, Dong H, Tian X, Zhong S, Wu Q, et al. An emergy accounting based regional sustainability evaluation: A case of Qinghai in China. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 152-160.
- [16] 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. 生态学报, 2013, 33(16): 5078-5089.
- [17] 宋豫秦, 曹明兰, 张力小. 京津唐城市生态系统能值比较. 生态学报, 2009, 29(11): 5882-5890.
- [18] Fang C L, Ren Y F. Analysis of emergy-based metabolic efficiency and environmental pressure on the local coupling and telecoupling between urbanization and the eco-environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(6): 1083-1097.
- [19] 王鹏, 刘小鹏, 姚晓艳, 陈晓, 孔福星. 基于能值分析的宁夏生态经济系统可持续发展评价. 生态经济, 2018, 34(1): 70-73.
- [20] 孙玥, 程全国, 李晔, 付佳. 基于能值分析的辽宁省生态经济系统可持续发展评价. 应用生态学报, 2014, 25(1): 188-194.
- [21] Wang C D, Wang Y T, Geng Y, Wang R Q, Zhang J Y. Measuring regional sustainability with an integrated social-economic-natural approach: a case study of the Yellow River Delta region of China. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 189-198.
- [22] Sun L, Dong H J, Geng Y, Li Z L, Liu Z, Fujita T, et al. Uncovering driving forces on urban metabolism——A case of Shenyang. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 171-179.
- [23] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 张妍, 张力小. 基于能值分析的都市生态系统健康评价——以包头市为例. 生态学报, 2008, 28(4): 1720-1728.
- [24] 李金平, 陈飞鹏, 王志石. 城市环境经济能值综合和可持续性分析. 生态学报, 2006, 26(2): 439-448.
- [25] 青海省地方志编纂委员会. 青海年鉴 2017. 西宁: 青海年鉴社, 2017.
- [26] 杨荣金, 舒俭民, 李秀红, 孙美莹, 孟伟. 柴达木盆地生态环境保护战略与对策. 科技导报, 2017, 35(6): 115-119.
- [27] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [28] Brown M T, Campbell D E, De Villbiss C, Ulgiati S. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis. *Ecological Modelling*, 2016, 339: 92-95.
- [29] Chen W, Liu W J, Geng Y, Ohnishi S, Sun L, Han W Y, et al. Life cycle based emergy analysis on China's cement production. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131: 272-279.
- [30] Brown M T, Bardi E. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios, Folio. #3*. Gainesville, FL, USA: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2001.
- [31] 庞明月, 张力小, 王长波. 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析. 生态学报, 2014, 34(3): 537-545.
- [32] Brown M T, Protano G, Ulgiati S. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. *Ecological Modelling*, 2011, 222: 879-887.
- [33] Brown M T, Ulgiati S. Emergy assessment of global renewable sources. *Ecological Modelling*, 2016, 339: 148-156.
- [34] Jiang M M, Zhou J B, Chen B, Chen G Q. Emergy-based ecological account for the Chinese economy in 2004. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008, 13(10): 2337-2356.
- [35] 卓玛措, 冯起, 司徒建华. 基于能值分析的青海省生态经济系统研究. 地域研究与开发, 2008, 27(1): 121-125.
- [36] 隋春花, 陆宏芳, 郑凤英. 基于能值分析的广东省生态经济系统综合研究. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2147-2152.
- [37] Li S, Luo X. Emergy assessment and sustainability of ecological-economic system using GIS in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 160-167.
- [38] Mu R M, Zuo J, Yuan X L. China's approach to nuclear safety-From the perspective of policy and institutional system. *Energy Policy*, 2015, 76: 161-172.