

DOI: 10.5846/stxb201801180136

孟伟庆, 莫训强, 李洪远, 胡蓓蓓, 贺梦璇. 基于扩展焓耗模型的中国可持续发展水平的区域空间差异. 生态学报, 2018, 39(5): - .

Meng W Q, Mo X Q, Li H Y, Hu B B, He M X. Spatial difference in the sustainable development level in China based on extended exergy analysis. Acta Ecologica Sinica, 2018, 39(5): - .

基于扩展焓耗模型的中国可持续发展水平的区域空间差异

孟伟庆¹, 莫训强¹, 李洪远^{2,*}, 胡蓓蓓¹, 贺梦璇¹

¹ 天津师范大学 地理与环境科学学院, 天津 300387

² 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350

摘要: 将区域作为一个以人类生产和消费为中心的社会—经济—自然复合生态系统, 构建了一种基于生物物理视角的生态热力学方法, 从整体角度对区域的可持续发展水平进行定量评价。该方法囊括了维持复合生态系统运转过程中的自然资源投入、人力资源投入和环境污染损害成本投入等三种要素, 完善了可持续发展评价以及绿色 GDP 核算中人力资源投入和环境成本的价值体现。然后以我国为例, 核算了我国 2006—2015 年间可持续发展水平的时空动态, 并以各省为边界, 计算了 2015 年的区域可持续发展水平差异。计算结果显示: (1) 十年间, 我国整体上的可持续发展水平在逐步提高, 能反映出我国生产率水平的提高和资源利用效率的提高; (2) 从要素投入看, 自然资源投入仍然占主要, 但比例在逐渐降低。环境成本投入比例呈逐步降低趋势, 说明环境保护取得了成效。另外, 在 2010 年后, 人力资源投入比例增加很快, 反映了我国经济发展中劳动力成本上升明显。 (3) 各省的计算结果差异较大, 在不考虑区域间进出口的情况下, 从 GDP 产出角度, 北京的可持续发展水平最高, 西藏最低。通过将本文的评价结果与绿色发展指数的评价结果进行比较, 发现具有较好的一致性。本研究建立的方法框架是对能值分析方法的扩展和完善, 在今后的研究中, 还需要继续对该方法框架中没有考虑全面的因素加以考虑, 以便于更全面客观地反映区域的可持续发展水平。

关键词: 可持续发展; 扩展焓耗; 可持续性; 生态热力学; 定量评价

Spatial difference in the sustainable development level in China based on extended exergy analysis

MENG Weiqing¹, MO Xunqiang¹, LI Hongyuan^{2,*}, HU Beibei¹, HE Mengxuan¹

¹ School of Geographic and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

² College of Environment Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China

Abstract: Based on the summary of energy and exergy, an integrated assessment method was established to evaluate regional sustainable development. Three parts included in this method were natural resources, human resources, and environmental cost. A region was regarded as a compound ecosystem combining society, economy, and the environment. It is an improvement of the exergy evaluation method and can be used in the evaluation of sustainable development and green GDP. After the introduction of the assessment method, the extended exergy account of China was calculated. The results showed that: (1) the sustainable development level has gradually improved from 2006 to 2015, which indicates the improvement of China's resource utilization efficiency; (2) From the perspective of resource, the proportion of natural resource inputs was still the highest, but the ratio has gradually decreased. The proportion of the environmental exergy cost

基金项目: 天津市科委科技特派员项目 (16JCTPJC53900); 国家留学基金项目 (201708120034)

收稿日期: 2018-01-18; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eiale@nankai.edu.cn

has also decreased. Moreover, the proportion of human resources displayed a rapid increase after 2010. This reflected the increasing labor cost. (3) Without considering interregional import and export, the sustainable development level of Beijing is the highest and Tibet is the lowest in terms of the exergy GDP ratio. In the future, it will be necessary to improve the index of this method to evaluate the sustainable development level.

Key Words: sustainable development; extended exergy; sustainability; thermodynamic method; assessment

可持续发展评价是可持续发展研究长期关注的热点,国内外的许多研究组织和学者都进行了研究,并且发展出了很多的评价方法。这些评价方法大体上可以分为指标类和模型类。指标类方法中,例如联合国可持续发展委员会提出的评价体系由 134 个指标组成,涉及经济指标、社会指标、环境指标和系统指标;世界银行的可持续发展指标体系则包含了自然资本、社会资产、人力资源和社会资源等四个方面的要素。在研究的时空尺度上,主要针对全国各省市尤其是某个地区、某个城市开展研究^[1-5]。在评价方法的采用上,比较多的采用了指标体系评价法,其中在指标的权重确定中,则采用了层次分析法、主成分分析法、模糊评价法^[6]、聚类分析法^[2]等。另外,生态经济学和生态热力学方面的生态足迹法^[7]和能值分析法相关方法等也在近年来得到很多的应用^[5,8-9]。还有就是采用模型方法或单一指数法的,如 DPSIR 模型^[3]、熵值法^[10]以及绿色 GDP 核算^[11]等。

自然生态系统是地球上一切生命活动的基础,可持续发展概念提出以来,生态系统产品和服务的重要性已经被广泛认可^[12-14]。根据热力学第二定律,所有的生产过程都是能量的耗散过程,都是一个熵增过程^[15],工业化和城市化意味着社会的熵转移。对于一个地区或国家来说,提倡“生态”和“绿色发展”等理念,实际上就是减少本地区的熵增,减少本区域经济社会发展中能源和资源的消耗,降低能量的耗散,提高利用效率。目前的研究中,主要关注了自然资源和能源成本的货币化量化,忽视了人力资源成本和环境支持成本^[16]。本文在已有研究的基础上,尝试将自然资源、人力资源和环境成本都考虑进来,采用生态热力学中的熵耗模型对区域的可持续发展水平进行定量评价。

太阳能、潮汐能和地热能是生物圈的主要驱动能源,美国生态学家 Odum 提出了能值(Emergy)理论,其定义为:一种流动或储存的能量中包含的另一种类别能量的数量,称为该能量的能值,因为任何形式的能量均来源于太阳能,因此以太阳能焦耳为基准衡量单位(solar equivalent joules)^[17]。能值分析实现了不同能量等级上不同质能量的统一度量。根据 Odum 的测算,全球总的太阳能值输入为 15.83×10^{24} sej/a^[18]。熵(Exergy)被定义为:系统从给定状态到与其周围环境达到平衡所能做的最大功^[19],它可以衡量系统目前状态与热力学平衡状态之间的距离。Exergy 注重的是能量的做功能力,它与环境介质紧密相联,值越高其做功能力就越大。因此,熵(或称可用能)测度的是资源或能源中可以转换为可用的部分。来自自然生态系统的熵被生产和消费过程直接或间接的消耗掉。从生态系统平衡角度,熵耗需要从外界得到补充,熵耗被认为是所有人类活动的最终成本^[20]。

能值和熵概念的异同:(1)熵是系统和环境的组合属性,当系统和环境达到平衡状态后,系统的熵值为零;(2)能值是熵的一种类型,是指直接或间接地用于转换产品或服务的熵耗^[21];(3)熵值的计算是必须要有系统边界的,而能值只是不同能量等级上不同质能量的统一度量单位。从目前已有的研究中,构建的能值评价方法和熵耗模型评价方法的计算过程来看,两种方法的异同包括:(1)能值方法本身不强调系统的边界特征,而熵耗模型重点强调系统的边界特征和与环境的平衡关系,在实际计算中,如果把能值方法用于区域评价的时候,也通常以区域的行政边界作为研究范围;(2)当系统边界、资源分类等相同的时候,能值方法和熵耗方法的计算基本是一样的。扩展熵耗的概念是由 Hau 和 Bakshi 在 2004 年首先提出的^[22],所谓“扩展”,是指除了表明系统成本的物质和能量外,还要包含外部性,即要把劳动力、资金和环境成本等包括进来,这样就实现了外部成本的内部化,因此该方法既可以从热动力学角度反映系统的效率,又能揭示整个社会系统运行中

隐藏的资源成本。

可持续发展评价方法主要包括指标类和模型类方法,其中指标类方法存在主观性较强以及指标间相互干扰、指标量纲不一致等问题,而模型类方法的优势在于能够比较好的反映整体性,但又存在如无法把涉及的因素较为全面进行考虑等问题。扩展能耗模型方法与指标评价方法相比,克服了指标间的共线性、量纲不统一、权重确定主观性较强等缺点,作为一种模型方法,扩展能耗模型把自然资源、环境成本和人力成本等包括进来,实现了能量、经济货币和社会因素等不同因素量纲的整合。由于指标的统一,就能够用于评价结果的横向和纵向比较。因此,该方法有很好的应用前景和优势。目前能耗评价多用于工业生产中,国外一些学者对生态系统服务和区域层面的评价进行了探讨^[19-20,22],并不断对评价方法进行完善,国内采用本方法框架对区域层面进行可持续发展评价的研究还很少。

1 评价方法

1.1 货币与能耗值的换算关系

在经济学领域中,衡量一个国家或地区的产出通常采用货币的方式或者物质量的方式,而能量是自然界的货币,如果把二者建立联系就能够实现能量(焦耳)与货币(元)的换算。例如,来源于自然资源(石油、天然气、风电和太阳能发电等)的电能作为商品卖给消费者,就是把自然资源的经济价值进行衡量(尽管没有完全体现自然资源的价值)^[23]。一个货币单位的能耗值当量可以采用下面的公式计算:

$$EMR = \frac{Ex_{in}}{C_{ref}} \quad (1)$$

式中,EMR 为能耗值货币比, Ex_{in} 为一定时间段内进入社会—经济—自然复合生态系统的总能耗值, C_{ref} 为某一时期内社会经济系统中所有商品和服务的价值量,通常采用国内生产总值(GDP)来衡量。EMR 能够被用于评价货币的实际购买力,还可以反映生产产品或服务所需要的能耗与相应的经济活动之间的关系^[24]。EMR 代表了单位 GDP 的能值投入。当然,对于一个具体的产品生产过程,货币的能耗值当量可以用下式表示:

$$EE_{xm} = EMR \times Money \quad (2)$$

式中, EE_{xm} 为体现在货币中的能耗值当量,EMR 为能耗值货币比,Money 为货币。

1.2 自然资源投入的能耗值当量

生态过程将全球的资源能耗值输入生态系统产品和服务,这些自然资源再通过工业过程转变为经济产品或服务^[20]。自然资源投入分为不可再生资源(例如原油、天然气、矿产和煤等)和可再生资源(例如水资源、风能、太阳能等)。为了避免重复计算,不可再生资源采用加和汇总,可再生资源采用非加和汇总^[20]。

$$EE_{x_{NR}} = \text{Max}\{Q_{rr,i} \times Tr_{rr,i}\} + \sum \{Q_{nr,j} \times Tr_{nr,j}\} \quad (3)$$

式中, $EE_{x_{NR}}$ 为单位时间内进入系统的总能耗值当量, $Q_{rr,i}$ 为第 i 种进入整个社会经济系统的可再生资源数量。同样, $Q_{nr,j}$ 为第 j 种不可再生资源的数量。 Tr_{rr} 和 Tr_{nr} 分别是可再生资源和不可再生资源的能值转换率。

$$Tr = \frac{Ex}{Q_p} \quad (4)$$

式中, Tr 表示生产单位产品(Q_p)需要的太阳能耗值当量(Ex)。能值转换率 Tr 的单位可以是 sej/j , sej/t , sej/kWh 或 sej/m^3 等。通过转换率,可以将不同形式的能量转换为同一能值单位,本文中的各种物质的转换率通过文献收集获取^[17, 25-29]。

1.3 人力资源投入的能耗值当量

在维持整个社会经济复合生态系统运转的过程中,人是其中重要的因素也是不可缺少的因素。人类在其中同时扮演着生产者和消费者的角色,一方面,通过人类的劳动投入完成各种经济活动过程,另一方面作为消费者使用各种资源。从投入的角度,劳动力直接或间接地都参与了生产过程和社会经济活动(可以通过维持劳动力的相关资源、能源和服务进行衡量)。由于人力资源投入因素的复杂性(如脑力投入、技术熟练等),准

确采用单一量纲进行衡量是很困难的。因此,为了计算的可行性,采用简化方式,假设人力资源的投入是能够通过工资收入来衡量,那么一个地区的人力资源总投入就可以采用该地区就业人员的工资总额衡量。实际计算中可以采用统计数据中的就业人员工资总额计算或者各行业的平均工资水平乘以就业人数。

同时结合前述公式(1),某一生产过程或者系统的人力资源投入的焓值当量可以通过焓值货币比换算:

$$EE_{x_{HR}} = EMR \times Income \quad (5)$$

式中, $EE_{x_{NR}}$ 为人力资源的焓值当量, EMR 为焓值货币比, $Income$ 为工资收入。

1.4 环境投入的焓值当量

社会经济系统运转的过程中,在利用资源的同时,也会把各种污染物排放到环境当中,给环境带来负面影响,要治理环境污染修复环境质量,可以看成是环境对经济活动的贡献。环境成本的焓值当量可以通过治理环境污染成本进行衡量,这就要求对环境质量的损失进行合理的评估。环境影响的焓值当量已经有一些学者进行了研究,但还存在一些问题,例如 Brown 等仅仅考虑了空气污染修复的焓值当量^[22],Ukidwe 等主要关注了环境污染对人体健康的损害^[24]。当然,由于生态系统的复杂性,不可能将人类利用资源对环境产生的所有负面影响都计算进来。为了计算的可行性,本研究中环境投入的焓值当量计算包括了污染物排放(空气污染物、水污染物和固体废物)、人类健康损失和生物多样性损失。

1.4.1 环境资源占用的焓值当量

当污染物排入环境后,环境要消解这些污染物就需要占用环境资源(空气和水污染物)或土地资源(固体废物)。为了避免重复计算,环境资源占用的焓值当量计算采用非加和汇总,计算方法如下:

$$EE_{x_{ERO}} = \text{Max}(EE_{x_{env,air,i}}) + \text{Max}(EE_{x_{env,water,i}}) + \text{Max}(EE_{x_{env,solid,i}}) \quad (6)$$

式中, $EE_{x_{ERO}}$ 为环境资源占用的焓值当量, $EE_{x_{env,air}}$ 和 $EE_{x_{env,water}}$ 分别为消解空气污染和水污染物所需环境资源的焓值当量,同样地, $EE_{x_{env,solid}}$ 为固体废物环境资源占用的焓值当量。

(1) 空气污染物和水污染物环境资源占用焓值当量

生态系统提供多种服务将污染物排放量稀释或降低到可接受的水平。该过程是包括物理、化学和生物等在内的综合过程。例如,稀释氨氮的焓耗取决于排放浓度、可接受的稀释浓度和水体的转换率。具体的计算过程为,首先,需要得到稀释污染物所需要空气或者水的用量:

$$M_{air/water} = d \times \left(\frac{W}{c}\right) \quad (7)$$

式中, $M_{air/water}$ 稀释污染物需要的空气数量或者用水量, d 是空气密度($1.23 \times 10^{-9} \text{ Mt/m}^3$)或水的密度($1.00 \times 10^{-6} \text{ Mt/m}^3$), W 是假定的污染物年排放量(Mt), c 是污染物的允许排放浓度或者背景值(表1)。

表1 空气和水污染物的环境可接受浓度

Table 1 Accepted concentrations of some air and water pollutants

污染物种类 Pollutant item	可接受浓度/(mg/m^3) Acceptable concentration	参考依据 References
总悬浮颗粒物	8.0×10^{-2}	《环境空气质量标准》GB 3095—012
CO	3.0×10	《环境空气质量标准》GB 3095—2012
CO ₂	2.0×10^3	《环境空气质量标准》GB 3095—2012
SO ₂	2.0×10^{-2}	《环境空气质量标准》GB 3095—2012
NO _x	5.0×10^{-2}	《环境空气质量标准》GB 3095—2012
甲烷	3.0×10^{-1}	《环境空气质量标准》GB 3095—2012
NH ₄ ⁺	1.5×10^2	《地表水环境质量标准》GB3838—2002
COD	1.5×10^4	《地表水环境质量标准》GB3838—2002
BOD ₅	3.0×10^3	《地表水环境质量标准》GB3838—2002
挥发酚	2.0	《地表水环境质量标准》GB3838—2002

当稀释污染物需要的空气数量或者用水量得到后,空气污染物和水污染物环境资源占用焓值当量可以采用下式计算:

$$EE_{env,air} = N_{kinetic} \times Tr_{air} = \frac{1}{2} \times M_{air} \times v^2 \times Tr_{wind} \quad (8)$$

$$EE_{env,water} = N_{chem} \times Tr_{chem,water} = (M_{water} \times G) \times Tr_{chem,water} \quad (9)$$

式中, $EE_{env,air}$ 为消解空气污染物需要占用的生态系统服务对应的焓当量, $N_{kinetic}$ 为通过风稀释空气需要的动能, Tr_{air} 假定为单位风能对应的太阳焓当量, M_{air} 为稀释污染物需要的空气数量, v 为平均风速, Tr_{wind} 为单位风能的太阳焓当量 $1.50 \times 10^3 \text{ sej/J}^{[22]}$, $EE_{env,water}$ 为消解水体污染物需要占用的生态系统服务对应的焓当量, N_{chem} 为水的化学可用能(等同于驱动化学转化的能力), $Tr_{chem,water}$ 为全球河流流动水体化学潜能的转换率 $2.78 \times 10^4 \text{ sej/J}^{[18]}$, M_{water} 为污水排放量, G 是相对于参考海水的单位质量水的吉布斯自由能 (4.94 J/g).

(2) 固体废物占用环境资源的焓值当量

固体废物占用环境资源可以通过土地占用的焓值当量进行计算:

$$EE_{env,solid} = A_{land} \times Tr_{land} = (M_{solid} \times R_{solid}) \times Tr_{land} \quad (10)$$

式中, $EE_{env,solid}$ 为固体废物需要占用的生态系统服务对应的焓当量, A_{land} 为固体废物的土地占用面积, Tr_{land} 为单位土地占用对应的年太阳焓当量, 本文中, 采用 $1.05 \times 10^{15} \text{ sej/ha}^{[18]}$, M_{solid} 为固体废物排放量, R_{solid} 为固体废物的土地占用率, 即每吨固体废物的土地占用面积。研究表明, 大约 $2.85 \times 10^4 \text{ t}$ 的工业固体废物占用 1 ha 土地, 因此本文中 R_{solid} 采用 $3.51 \times 10^{-4} \text{ ha/t}^{[0]}$ 。

1.4.2 污染物对人类健康影响的焓值当量

污染物排放对人类健康造成的影响可以看作是环境资源的间接投入。本研究中借鉴残疾调整生命年指标 (DALY) 指标用来衡量污染物排放对人类福利健康的影响^[31]。当然, 影响的大小与污染物特征、对人体的暴露以及对人体解剖学效应等有关。污染物对人类健康影响的焓值当量可以采用下式计算:

$$EE_{HH} = T_{DALY} \times \sum \{M_i \times DALY_i\} \quad (11)$$

公式中, EE_{HH} 为人类健康影响的焓值当量, T_{DALY} 为维持单位人类生命年所需的太阳焓当量, 是经济体年消耗的总太阳焓当量与人口的比值; $M_i (\text{kg})$ 为第 i 污染物质量; $DALY (\text{a/kg})$ 为单位 i 污染物潜在造成的人类残疾调整生命年, 单位为年^[32]。

1.4.3 污染物造成生物多样性损失的焓值当量

污染物排放不仅仅对环境质量有负面影响, 同时对生物多样性也会产生有害影响。更严重的是, 生物多样性损害会导致生态系统的退化。由于遗传多样性和生态系统多样性难以衡量, 为了计算的简单, 采用物种数量代表生物多样性, 计算公式如下:

$$EE_{BioL} = E_{bio} \times \sum \{M_i \times SL_i\} \quad (12)$$

式中, EE_{BioL} 为生物多样性损失的焓值当量, E_{bio} 为维持物种生存所需的年太阳焓当量, 是全球年消耗总太阳焓当量与物种总量的比值, M_i 为第 i 污染物质量 (kg), SL_i 为单位 i 污染物潜在造成的物种损失量, 单位为物种数 a kg^{-1} ^[33]。

1.5 总的扩展能耗账户构建

基于上述计算过程, 可以构建出完整的扩展能耗账户, 该账户包括了自然资源投入、人力资源投入和环境成本投入, 汇总公式如下:

$$EE_{total} = EE_{NR} + EE_{HR} + EE_{ENV} \quad (13)$$

EE_{total} 为进入一个系统的总能耗, EE_{NR} 为自然资源利用过程中的能耗总和, 代表了自然资源的可持续水平, EE_{HR} 为人类资源投入的焓值当量, 也代表了社会经济层面的可持续性, EE_{ENV} 为环境资源投入的焓值当量, 代表环境可持续性。

利用上述构建的方法,以我国行政边界及各省区行政边界为研究范围,在不考虑进出口的情况下评价我国可持续发展水平的空间差异和时间序列变化。由于篇幅原因,这里分成两个部分进行结果分析,一是从整体上计算我国 2006—2015 年期间可持续发展水平的变化情况,二是以 2015 年为例,分析我国各省之间可持续发展水平的空间差异。

2 结果分析

2.1 我国 2006—2015 年可持续发展水平变化

从计算的结果来看(表 2—4),我国 2006—2015 年间,维持社会经济系统的能耗整体上呈现上升趋势,但与我国 GDP 的增长相比,GDP 增长速度快于能耗,GDP 能耗比呈现明显的上升(图 1),这反映了我国单位能耗的 GDP 产出在增加,说明我国的自然资源利用效率在提高。但从人均能耗来看,我国整体上的人均能耗值在缓慢上升,2015 年的人均能耗值比 2006 年增加了 26.2%,该数据从另外一个角度说明了我国居民的生活水平在上升。

表 2 中国 2015 年社会—经济—自然复合生态系统扩展能耗账户

Table 2 Extended exergy account of society-economy-nature compound ecosystem of China in 2015

	项目 Item	原始数据 Data	单位 Unit	能值转换率 Transformity/ (sej/unit)	转换率参考来源 References source	累积能耗 cumulative exergy consumption/ (sej/a)
可更新资源投入 Renewable resources	1 太阳能	5.10×10^{22}	J	1.00	[17]	5.10×10^{22}
	2 风能	4.84×10^{21}	J	1.50×10^3	[22]	7.26×10^{24}
	3 雨水势能	6.13×10^{19}	J	1.75×10^4	[17]	1.07×10^{24}
	4 雨水化学能	3.09×10^{19}	J	3.05×10^4	[17]	9.42×10^{23}
	5 地球旋转能	1.40×10^{19}	J	5.76×10^4	[17]	8.05×10^{23}
可更新资源能耗非加和汇总 Nonadditive counting of renewable resources						7.26×10^{24}
不可更新资源投入 Nonrenewable resources	6 煤	8.01×10^{19}	J	3.98×10^4	[34]	3.19×10^{24}
	7 石油	2.30×10^{19}	J	9.08×10^4	[35]	2.09×10^{24}
	8 天然气	7.20×10^{18}	J	9.85×10^4	[35]	7.09×10^{23}
	9 电能	2.09×10^{19}	J	1.60×10^5	[34]	3.34×10^{24}
	10 复合肥	2.18×10^{13}	g	2.80×10^9	[35]	6.09×10^{22}
	11 磷肥	8.43×10^{12}	g	3.90×10^9	[35]	3.29×10^{22}
	12 钾肥	6.42×10^{12}	g	1.10×10^9	[35]	7.07×10^{21}
	13 氮肥	2.36×10^{13}	g	3.80×10^9	[35]	8.97×10^{22}
	14 农药	1.78×10^{12}	g	1.60×10^{12}	[35]	2.85×10^{24}
	15 农膜	2.60×10^{12}	g	3.80×10^8	[35]	9.89×10^{20}
不可更新资源能耗加和汇总 Additive counting of nonrenewable resources						1.24×10^{25}
人力资源投入 Human labor resources	16 劳动力	1.12×10^{13}	元	2.86×10^{11}	根据当年 数据核算	3.21×10^{24}
环境成本投入 Environment cost	17 环境资源占用能耗					7.47×10^{21}
	空气污染能耗					5.36×10^{21}
	水污染能耗					2.10×10^{21}
	固体废物占用能耗					4.23×10^{18}
	18 人体健康能耗					1.94×10^{23}
	19 生物多样性能耗					6.33×10^{21}
环境成本投入加和汇总 Additive counting of environment cost						2.08×10^{23}
总扩展能耗账户 Total exergy						2.31×10^{25}

以 2015 年为例(表 2),自然资源焓耗中,不可更新资源占到自然资源焓耗的 63.02%,说明我国的经济社会发展中,不可更新资源的所占比例仍然很高。环境成本焓耗约占 2015 年整体焓耗的 14%,可见环境系统作为容纳污染物的容器,在消解污染物,维持生态系统健康方面为社会经济提供了基础支撑作用,已有的研究中对环境污染治理成本的计算主要是从处理废物的经济投入角度计算的,而由于处理技术、设备和处理标准的不同,造成处理成本差别很大,不能很好的体现环境系统对污染物的成本投入。通过本文的计算,可以看出,环境在利用其环境容量消解污染物,实际上就是为我们的社会经济系统做出贡献,可以看成是 socioeconomic 发展过程中的环境成本投入。具体的数据上,环境污染对人类健康的影响远远高于环境资源占用和生物多样性焓耗,由于数据的缺乏,本研究只计算了统计数据中已有的常见污染物的健康影响,而实际上,由于污染物排放种类和数量的复杂性,污染物的健康影响焓耗要远大于本文的计算(表 3)。如果按照绿色 GDP 的计算思路,环境成本要占到我国 GDP 的 20% 以上,我国的环境保护还有很多的历史欠账和紧迫工作需要做。

表 3 中国 2015 年社会经济自然复合生态系统环境焓耗账户
Table 3 Extended environment exergy account of China in 2015

项目 Item	原始数据 Data/g	可接受浓度 Acceptable concentration/ (mg/m ³)	环境资源 占用焓耗 Exergy of environment resources occupation/sej	残疾调整生命年 Disability adjusted life years/ (a/kg)	健康影响焓耗 Exergy of human health effect/ (sej)	物种损失量 Species loss/ (物种数 a kg ⁻¹)	生物多样性 损失焓耗 Exergy of biodiversity loss/(sej)
空气污染物 Air pollutants	烟尘 SO ₂ NO _x	1.28×10 ¹³ 1.86×10 ¹³ 1.85×10 ¹³	8.00×10 ⁻² 2.00×10 ⁻² 5.00×10 ⁻²	9.22×10 ²⁰ 5.36×10 ²¹ 2.13×10 ²¹	3.75×10 ⁻⁴ 5.20×10 ⁻⁵ 5.72×10 ⁻⁵	1.25×10 ²³ 2.64×10 ²² 4.27×10 ²²	n.a. 5.80×10 ⁻⁹ 3.25×10 ⁻⁹
求和 Sum						1.94×10 ²³	6.33×10 ²¹
消解空气污染物需要占用的焓耗 Exergy needed to dissipate the air pollutants			5.36×10 ²¹				
水污染物 Water pollutants	NH ₄ -H COD	2.30×10 ¹² 2.22×10 ¹³	1.50×10 ² 1.50×10 ⁴	2.10×10 ²¹ 2.04×10 ²⁰	n.a. n.a.	n.a. n.a.	n.a.
消解水污染物需要占用的焓耗 Exergy needed to dissipate the water pollutants			2.10×10 ²¹				
固体废物 Solid wastes		1.15×10 ¹⁴		4.23×10 ¹⁸			
环境资源占用焓耗 Exergy of environment resources occupation			7.47×10 ²¹				
总环境焓耗 Total environment exergy						2.08×10 ²³	

n.a. 表示缺乏数据

从全国的整体情况来看,可更新资源在有限的时间尺度和确定的空间边界尺度内,基本上没有较大变化(表 4),不可更新资源的使用量在持续增加。2006—2015 年间,我国 GDP 的增长速率高于整体系统的焓耗增长速度(图 1),从图 2 可以看出,单位焓耗的 GDP 产出在提高,说明我国整体上的可持续发展水平在逐步提高,也能反映出我国生产率水平的提高和资源利用效率的提高。从要素投入看,自然资源投入仍然占主要,但比例在逐渐降低。环境成本投入比例呈逐步降低趋势,说明环境保护取得了成效。另外在 2010 年后,人力资源投入比例增加很快,反映了我国经济发展中劳动力成本上升明显(图 3)。原因是居民的工资收入在增加,反映在整个经济社会系统就是人力资源成本的增加,说明人们的健康水平、福利水平在提高。从可持续发展角度来看,可以预见,由于我国人口红利的逐渐减少,今后人力资源成本还将继续上升。因此,需要更加注重科技的发展和技术水平的提高,用更少的人力资源产出更多的价值。

表 4 中国 2006—2015 年社会—经济—自然复合生态系统扩展消耗账户
Table 4 Extended exergy account of China between 2006 and 2015

项目 Item/ (sej/a)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
人口 population	1.31×10 ⁵	1.32×10 ⁵	1.33×10 ⁵	1.33×10 ⁵	1.34×10 ⁵	1.35×10 ⁵	1.35×10 ⁵	1.36×10 ⁵	1.37×10 ⁵	1.37×10 ⁵
GDP	2.19×10 ⁵	2.70×10 ⁵	3.20×10 ⁵	3.49×10 ⁵	4.13×10 ⁵	4.89×10 ⁵	5.40×10 ⁵	5.95×10 ⁵	6.44×10 ⁵	6.86×10 ⁵
工资总额 salary	2.43×10 ⁴	2.95×10 ⁴	3.53×10 ⁴	4.03×10 ⁴	4.73×10 ⁴	6.00×10 ⁴	7.09×10 ⁴	9.31×10 ⁴	1.03×10 ⁵	1.12×10 ⁵
可更新资源投入	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²	5.10×10 ²²
Renewable resources	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴
1 风能	9.86×10 ²³	1.03×10 ²⁴	1.01×10 ²⁴	9.47×10 ²³	1.13×10 ²⁴	9.20×10 ²³	1.11×10 ²⁴	1.08×10 ²⁴	1.05×10 ²⁴	1.07×10 ²⁴
3 雨水势能	8.66×10 ²³	9.02×10 ²³	8.88×10 ²³	8.32×10 ²³	9.90×10 ²³	8.08×10 ²³	9.72×10 ²³	9.50×10 ²³	9.23×10 ²³	9.42×10 ²³
4 雨水化学能	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³	8.05×10 ²³
5 地球旋转变能	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴	7.26×10 ²⁴
可更新资源消耗非加和汇总 Nonadditive counting of renewable resources	2.42×10 ²⁴	2.63×10 ²⁴	2.67×10 ²⁴	2.80×10 ²⁴	2.91×10 ²⁴	3.16×10 ²⁴	3.21×10 ²⁴	3.27×10 ²⁴	3.25×10 ²⁴	3.19×10 ²⁴
不可更新资源投入	1.33×10 ²⁴	1.41×10 ²⁴	1.42×10 ²⁴	1.46×10 ²⁴	1.67×10 ²⁴	1.73×10 ²⁴	1.82×10 ²⁴	1.89×10 ²⁴	1.97×10 ²⁴	2.09×10 ²⁴
Nonrenewable resources	2.06×10 ²³	2.59×10 ²³	2.98×10 ²³	3.29×10 ²³	3.92×10 ²³	4.79×10 ²³	5.37×10 ²³	6.26×10 ²³	6.86×10 ²³	7.09×10 ²³
8 天然气	1.65×10 ²⁴	1.88×10 ²⁴	1.99×10 ²⁴	2.13×10 ²⁴	2.42×10 ²⁴	2.71×10 ²⁴	2.87×10 ²⁴	3.12×10 ²⁴	3.25×10 ²⁴	3.34×10 ²⁴
9 电能	3.88×10 ²²	4.21×10 ²²	4.50×10 ²²	4.76×10 ²²	5.04×10 ²²	5.31×10 ²²	5.57×10 ²²	5.76×10 ²²	5.92×10 ²²	6.09×10 ²²
10 复合肥	3.00×10 ²²	3.01×10 ²²	3.04×10 ²²	3.11×10 ²²	3.14×10 ²²	3.19×10 ²²	3.23×10 ²²	3.24×10 ²²	3.30×10 ²²	3.29×10 ²²
11 磷肥	5.61×10 ²¹	5.87×10 ²¹	6.00×10 ²¹	6.21×10 ²¹	6.45×10 ²¹	6.66×10 ²¹	6.79×10 ²¹	6.90×10 ²¹	7.06×10 ²¹	7.07×10 ²¹
12 钾肥	8.60×10 ²²	8.73×10 ²²	8.75×10 ²²	8.85×10 ²²	8.94×10 ²²	9.05×10 ²²	9.12×10 ²²	9.10×10 ²²	9.09×10 ²²	8.97×10 ²²
13 氮肥	2.46×10 ²⁴	2.60×10 ²⁴	2.68×10 ²⁴	2.73×10 ²⁴	2.81×10 ²⁴	2.86×10 ²⁴	2.89×10 ²⁴	2.88×10 ²⁴	2.89×10 ²⁴	2.85×10 ²⁴
14 农药	7.01×10 ²⁰	7.36×10 ²⁰	7.63×10 ²⁰	7.90×10 ²⁰	8.26×10 ²⁰	8.72×10 ²⁰	9.06×10 ²⁰	9.47×10 ²⁰	9.80×10 ²⁰	9.89×10 ²⁰
15 农膜	8.22×10 ²⁴	8.94×10 ²⁴	9.23×10 ²⁴	9.64×10 ²⁴	1.04×10 ²⁵	1.11×10 ²⁵	1.15×10 ²⁵	1.20×10 ²⁵	1.22×10 ²⁵	1.24×10 ²⁵
不可更新资源消耗加和汇总 Additive counting of nonrenewable resources	1.71×10 ²⁴	1.77×10 ²⁴	1.82×10 ²⁴	1.95×10 ²⁴	2.02×10 ²⁴	2.25×10 ²⁴	2.46×10 ²⁴	3.01×10 ²⁴	3.11×10 ²⁴	3.21×10 ²⁴
人力资源投入	8.76×10 ²¹	7.86×10 ²¹	7.86×10 ²¹	7.51×10 ²¹	7.40×10 ²¹	8.78×10 ²¹	8.43×10 ²¹	8.15×10 ²¹	7.88×10 ²¹	7.47×10 ²¹
Human labor resources	7.46×10 ²¹	6.69×10 ²¹	6.69×10 ²¹	6.38×10 ²¹	6.30×10 ²¹	6.39×10 ²¹	6.11×10 ²¹	5.89×10 ²¹	5.69×10 ²¹	5.36×10 ²¹
环境成本投入	1.29×10 ²¹	1.16×10 ²¹	1.16×10 ²¹	1.12×10 ²¹	1.10×10 ²¹	2.38×10 ²¹	2.32×10 ²¹	2.25×10 ²¹	2.18×10 ²¹	2.10×10 ²¹
Environment cost	2.36×10 ¹⁸	3.10×10 ¹⁸	3.10×10 ¹⁸	3.28×10 ¹⁸	3.54×10 ¹⁸	3.71×10 ¹⁸	3.87×10 ¹⁸	3.87×10 ¹⁸	3.96×10 ¹⁸	4.23×10 ¹⁸
空气污染消耗	2.55×10 ²³	2.61×10 ²³	2.59×10 ²³	2.66×10 ²³	1.03×10 ²³	2.36×10 ²³	2.54×10 ²³	2.05×10 ²³	1.96×10 ²³	1.94×10 ²³
水污染消耗	8.97×10 ²¹	8.63×10 ²¹	8.24×10 ²¹	7.91×10 ²¹	7.84×10 ²¹	7.80×10 ²¹	7.50×10 ²¹	7.20×10 ²¹	6.86×10 ²¹	6.33×10 ²¹
固体废物占用消耗	2.73×10 ²³	2.77×10 ²³	2.75×10 ²³	2.81×10 ²³	1.18×10 ²³	2.53×10 ²³	2.70×10 ²³	2.20×10 ²³	2.11×10 ²³	2.08×10 ²³
18 人体健康消耗	1.75×10 ²⁵	1.82×10 ²⁵	1.86×10 ²⁵	1.91×10 ²⁵	1.98×10 ²⁵	2.09×10 ²⁵	2.15×10 ²⁵	2.25×10 ²⁵	2.28×10 ²⁵	2.31×10 ²⁵
19 生物多样性消耗										
环境成本投入加和汇总 Additive counting of environment cost										
总扩展消耗账户 Total exergy										



图1 中国2006—2015年GDP与能耗的增长趋势

Fig.1 Trend of GDP and exergy increase of China

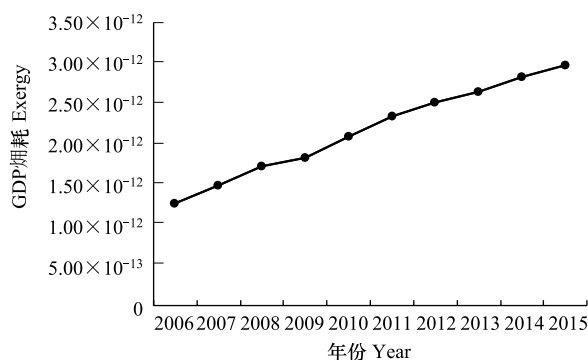


图2 单位能耗的GDP产出变化趋势

Fig.2 Trend of GDP exergy ratio of China

2.2 我国2015年各省区的可持续发展水平空间差异

为了观察我国不同地区可持续发展水平的差异,采用同样的方法对我国31个省区2015年的扩展能耗账户进行了核算(表5),通过汇总可以发现,我国不同地区区间的能耗差异很大,其中总能耗最多的是新疆,海南最少,新疆是海南的15.79倍。从不可更新资源的投入看,投入最高的分别是山东、江苏、广东、河南、河北,投入最少的依次是西藏、青海、海南和北京。当然,由于各个地区的面积等自然条件差距很大,总能耗不能反映生产效率和可持续发展水平。因此本研究中,分析了人均能耗、单位GDP能耗、能耗组成差异等指标,可以更加客观的对计算结果从多个角度进行观察。

首先从能耗的组成差异看(图4),与全国的整体组成类似,各省区的能耗组成中,自然资源投入都占了最大的比例。其中,自然资源投入方面,内蒙古、湖南和山东排在前三位,说明这三个省区中,自然资源消耗所占比例较大。北京、西藏、上海和新疆的人力资源投入位于前四位,说明人力资源投入并不是与经济发展水平呈线性关系。环境投入能耗方面,河北、辽宁、山西排在前三位,说明这三个省份的环境污染在整个社会经济系统中对环境造成的压力最大。从计算结果可以发现,无论是总量上还是比例组成上,该方法的计算结果与实际情况能够有比较好的吻合。例如,在环境投入能耗方面,河北、辽宁和山西都属于资源型、污染严重的区域。人力资源方面,北京和上海属于经济发达省份,居民的平均工资水平高,因此人力投入成本要远远高于其他省区。而西藏和新疆的人力资源投入较大,也和当地的平均工资水平有关。

从反过来的角度,从绝对数据角度,环境能耗最少的是西藏、海南、北京和天津,从比例角度,环境能耗最少的分别是西藏、海南、青海和西藏。这说明西藏、海南两个地区,无论从污染物排放的绝对量和相对量对地区环境的压力都最小。天津的环境能耗总量虽小,但其所占总能耗比例却较大,说明天津地区的环境压力较大。另外还可以观察到,自然资源能耗绝对量和比例都较大的省区,大多数属于经济欠发达省份,这能反映另外一个规律,那就是经济水平的提高有助于资源利用效率的提高。要提高经济欠发达地区的可持续发展水平,一是加快技术升级,提升资源利用效率,另外一个途径就是升级产业结构,减少资源利用产业的比例。

根据可持续发展的定义,其核心词是发展,兼顾了公平与效率两个方面,因此很难用单一指标进行可持续发展水平的衡量。例如,发达国家利用资源的效率高,单位能耗能够产出更多的GDP,但从公平角度来看,其人均能耗很高,消耗的过多的资源。基于此,本文对我国各省区2015年的可持续发展水平从单位GDP能耗和人均能耗两个指标进行比较,同时与国家统计局、国家发展和改革委员会、环境保护部和中央组织部四个部

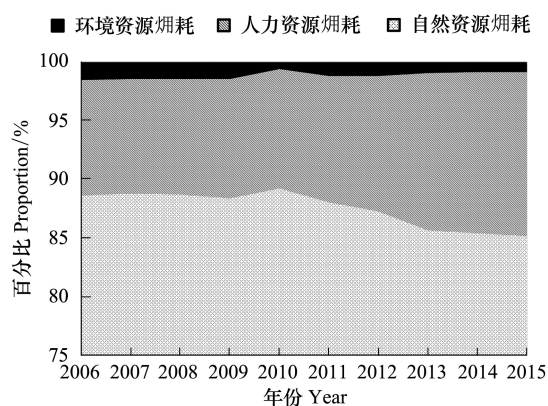


图3 我国2006—2015年能耗的组成比例

Fig.3 Proportion of exergy account of China

门共同发布的 2016 年我国各省区绿色发展指数进行对比。绿色发展指数采用综合指数法进行测算,共包括资源利用、环境治理、环境质量、生态保护、增长质量、绿色生活、公众满意程度等 7 个方面的 56 项评价指标^[36]。

表 5 中国各省份 2015 年社会—经济—自然复合生态系统扩展能耗账户

Table 5 Extended exergy account of China's provinces in 2015

省份 Province	可更新资源能耗 Exergy of renewable resources/ (sej/a)	不可更新资源能耗 Exergy of renewable resources/ (sej/a)	人力资源投入能耗 Exergy of human resources/ (sej/a)	环境成本投入能耗 Exergy of environment cost/ (sej/a)	总扩展能耗账户 Total exergy account/ (sej/a)
新疆	1.25×10^{24}	4.30×10^{23}	3.77×10^{23}	8.88×10^{21}	2.07×10^{24}
内蒙古	8.89×10^{23}	6.46×10^{23}	1.48×10^{23}	1.37×10^{22}	1.70×10^{24}
山东	1.19×10^{23}	1.06×10^{24}	1.32×10^{23}	1.71×10^{22}	1.33×10^{24}
西藏	9.19×10^{23}	1.76×10^{22}	2.95×10^{23}	3.13×10^{20}	1.23×10^{24}
广东	1.34×10^{23}	7.42×10^{23}	1.55×10^{23}	7.30×10^{21}	1.04×10^{24}
河南	1.27×10^{23}	7.00×10^{23}	1.12×10^{23}	1.36×10^{22}	9.52×10^{23}
河北	1.39×10^{23}	6.91×10^{23}	9.16×10^{22}	2.09×10^{22}	9.43×10^{23}
江苏	5.40×10^{20}	8.08×10^{23}	1.18×10^{23}	1.07×10^{22}	9.37×10^{23}
四川	3.65×10^{23}	3.88×10^{23}	1.16×10^{23}	6.80×10^{21}	8.77×10^{23}
山西	1.18×10^{23}	6.09×10^{23}	1.30×10^{23}	1.90×10^{22}	8.76×10^{23}
黑龙江	3.42×10^{23}	3.60×10^{23}	1.01×10^{23}	8.80×10^{21}	8.12×10^{23}
甘肃	3.43×10^{23}	2.79×10^{23}	1.27×10^{23}	4.95×10^{21}	7.53×10^{23}
青海	5.44×10^{23}	7.53×10^{22}	9.85×10^{22}	2.98×10^{21}	7.21×10^{23}
湖北	1.38×10^{23}	4.52×10^{23}	7.64×10^{22}	6.77×10^{21}	6.73×10^{23}
浙江	7.69×10^{22}	4.89×10^{23}	9.37×10^{22}	7.84×10^{21}	6.67×10^{23}
云南	2.94×10^{23}	2.76×10^{23}	9.00×10^{22}	5.31×10^{21}	6.66×10^{23}
安徽	1.05×10^{23}	4.78×10^{23}	7.47×10^{22}	8.18×10^{21}	6.65×10^{23}
湖南	1.60×10^{23}	4.26×10^{23}	6.10×10^{22}	6.92×10^{21}	6.54×10^{23}
陕西	2.08×10^{23}	3.43×10^{23}	8.72×10^{22}	8.88×10^{21}	6.47×10^{23}
辽宁	1.11×10^{23}	4.37×10^{23}	6.33×10^{22}	1.37×10^{22}	6.25×10^{23}
广西	1.78×10^{23}	2.78×10^{23}	5.74×10^{22}	5.26×10^{21}	5.19×10^{23}
江西	1.26×10^{23}	3.13×10^{23}	6.37×10^{22}	6.98×10^{21}	5.10×10^{23}
吉林	1.41×10^{23}	2.66×10^{23}	4.98×10^{22}	6.33×10^{21}	4.64×10^{23}
福建	9.34×10^{22}	3.06×10^{23}	5.78×10^{22}	4.98×10^{21}	4.62×10^{23}
贵州	1.33×10^{23}	2.47×10^{23}	6.53×10^{22}	5.48×10^{21}	4.51×10^{23}
宁夏	4.97×10^{22}	1.67×10^{23}	3.34×10^{22}	3.84×10^{21}	2.54×10^{23}
上海	4.52×10^{21}	1.72×10^{23}	4.96×10^{22}	2.27×10^{21}	2.28×10^{23}
重庆	6.18×10^{21}	1.86×10^{23}	3.05×10^{22}	3.82×10^{21}	2.26×10^{23}
北京	1.21×10^{22}	1.28×10^{23}	5.25×10^{22}	9.68×10^{20}	1.93×10^{23}
天津	9.04×10^{21}	1.32×10^{23}	2.02×10^{22}	1.96×10^{21}	1.63×10^{23}
海南	2.64×10^{21}	1.10×10^{23}	1.75×10^{22}	4.99×10^{20}	1.31×10^{23}

从经济产出效率看,单位 GDP 能耗指数排序中,北京、上海、天津、江苏和广东排在前五位,说明这几个地区的经济生产效率较高(表 6)。从人均能耗来看,贵州、北京、山东、吉林和河北排在前五位。与绿色发展指数进行比较可以看到,两种方法的评价结果排序有较好的一致性。例如排在第一位的都是北京,而山西、宁夏、内蒙古、甘肃、新疆、青海、西藏等省区,除了甘肃的排序差异较大外,其他的排序在两种评价结果都排在后边。这也间接表明了本研究的方法具有进行可持续发展水平评价的可行性。

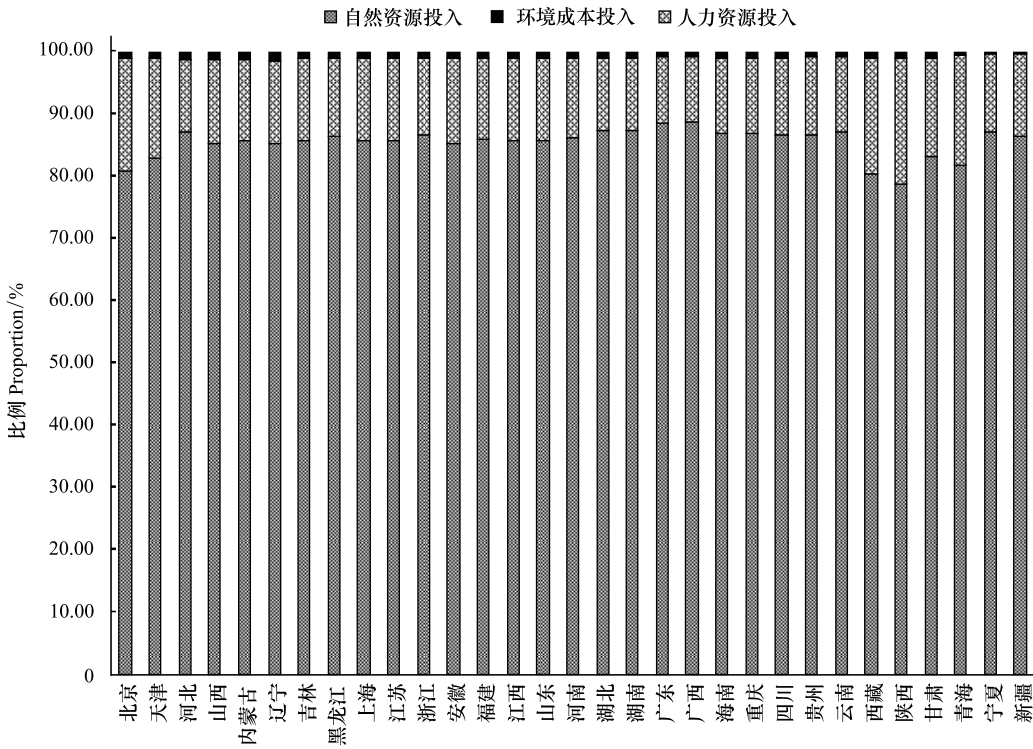


图4 中国各省份 2015 年焓耗的组成比例

Fig.4 Proportion of exergy account of China's provinces in 2015

表6 中国各省份 2015 年焓耗效率

Table 6 Extended exergy efficiency of China's provinces in 2015

省份 Province	焓耗/GDP Exergy/GDP (本研究计算)	排序 Sequence	焓耗/人口 Exergy/population (本研究计算)	排序 Sequence	绿色发展指数 Green development index (国家统计局等)	排序 Sequence
北京	119.01	1	8.99	2	83.71	1
上海	110.09	2	10.52	7	81.83	4
天津	101.62	3	12.70	16	76.54	28
江苏	74.87	4	23.91	25	80.41	9
广东	70.09	5	67.60	28	79.57	13
重庆	69.48	6	14.26	20	81.67	5
浙江	64.30	7	16.84	22	82.61	3
福建	56.26	8	21.30	24	83.58	2
山东	47.53	9	9.45	3	79.11	18
辽宁	45.87	10	11.74	13	76.58	27
湖南	44.20	11	12.04	15	80.48	8
湖北	43.89	12	10.83	9	80.71	7
河南	38.86	13	12.03	14	78.1	22
四川	34.26	14	11.17	10	79.4	14
安徽	33.07	15	13.46	18	79.02	19
江西	32.80	16	10.04	6	79.28	15
广西	32.40	17	11.50	12	79.58	12
河北	31.62	18	9.64	5	78.96	20
吉林	30.33	19	9.58	4	79.6	11
海南	28.29	20	11.27	11	80.85	6

续表

省份 Province	能耗/GDP Exergy/GDP (本研究计算)	排序 Sequence	能耗/人口 Exergy/population (本研究计算)	排序 Sequence	绿色发展指数 Green development index (国家统计局等)	排序 Sequence
陕西	27.86	21	14.37	21	77.94	23
贵州	23.30	22	7.50	1	79.15	17
云南	20.46	23	10.69	8	80.28	10
黑龙江	18.58	24	12.77	17	78.2	21
山西	14.57	25	14.04	19	76.78	26
宁夏	11.45	26	387.47	31	76	29
内蒙古	10.62	27	17.06	23	77.9	24
甘肃	9.02	28	28.97	26	79.22	16
新疆	4.51	29	122.63	30	75.2	31
青海	3.35	30	40.38	27	76.9	25
西藏	0.83	31	94.76	29	75.36	30

3 讨论

通过前述对可持续发展概念的分析,可持续发展的核心是发展,同时要追求效率与公平的统一。需要从经济发展、人类生活和自然生态系统等不同角度进行多维度衡量,要实现经济高效发展、人类生活水平的不断提高以及自然生态系统功能和服务的维持。目前关于可持续发展的理念已经基本取得共识,核心的难点是如何能够科学的进行可持续发展的评价。本文在总结已有研究的基础上,对能值评价方法进行了扩展,建立了基于能值理论的扩展能值计算方法框架,该方法囊括了维持复合生态系统运转过程中的自然资源消耗、人力资源投入和环境污染损害成本投入等三种主要影响因素,完善了可持续发展评价以及绿色 GDP 核算中资源和环境的价值体现,可以从整体角度对区域的可持续发展水平进行定量评价。将方法应用于我国,从计算结果来看,能够较好的反映我国近十年来的经济发展趋势和环境保护力度,同时从各省区的差异看,也能反映不同地区的经济发展水平和资源利用效率,以及人力成本在维持社会经济系统运转中的价值体现。

在可持续发展水平评价中,能值方法应用方面的研究较为丰富,本文构建的方法与能值方法相比较,改进的方面包括:(1)在能值方法中,是将可再生资源的分项和不可再生资源的分项采用直接加和的方式进行计算,这样会造成可再生资源的重复计算。因此在能值方法中,将不可再生采用加和汇总,而可再生资源采用非加和汇总,这样就避免了重复计算;(2)已有的能值方法计算中在劳动力投入方面大多数只从货币流输入角度计算劳动力的输入,对本地人力资源的投入,尤其是服务部分的计算缺乏。(3)在大部分的能值研究中,主要采用成本法,然后乘以能值货币比率来计算生产过程产生的污染物的环境影响,并没有考虑排放对生态系统完整性的影响,这也是能值方法作为环境核算方法被质疑的主要方面,本文构建的能值方法主要是对环境影响部分进行扩展,也是本文的主要创新之处。当然,由于环境影响的复杂性,还需要不断的完善。

本方法的不足方面:尽管采用了能值的概念和太阳能焦耳的评价指标,但本文建立的方法仍然属于一种相对方法,通过建立能值货币比值的这一经济学与生态热力学关联的过程,可以看到,该关联过程仍然是个相对值,因为无法衡量单位货币的能值当量到底应该是多少,但即使是这样,用于横向或纵向比较区域的可持续发展水平已经足够。另外就是本文在计算中没有考虑各地区之间资源的进出口情况,只是将各省看成一个黑箱整体考虑,实际上,需要把进出口的能值流进行充分的描述,能更真实的反映一个地区对外界的依赖程度。因此在今后的研究中,还需要继续对该方法框架中没有考虑全面的因素加以考虑,并与其它评价方法进行比较,以便于更全面客观地反映区域的可持续发展水平。

4 结论

通过构建包括资源、能源、经济、人力资源、环境成本等要素的扩展焓耗模型,是对已有能值方法的扩展和完善,对维持区域复合生态系统的全成本投入有了更为全面的考虑,该方法框架可以为区域绿色 GDP 核算、可持续发展水平评价、碳排放核算等相关研究提供思路,并能够进行横向和纵向的对比。从对我国的整体可持续发展水平计算的结果来看,2006—2015 年间我国焓耗整体上呈现上升趋势,GDP 增长速度快于焓耗,自然资源利用效率在提高。但我国的经济社会发展中,不可更新资源占到自然资源焓耗的 63.02%,所占比例仍然很高。在环境影响方面,环境成本要占到我国 GDP 的 20%以上,我国的环境保护还有很多的历史欠账和紧迫工作需要做。在 2010 年后,人力资源投入比例增加很快,反映了我国经济发展中劳动力成本上升明显。我国不同地区间的焓耗差异很大,其中总焓耗最多的是新疆,海南最少。自然资源焓耗绝对量和比例都较大的省区,大多数属于经济欠发达省份,表明经济水平的提高有助于资源利用效率的提高。将本文计算的结果与 2016 年我国各省区绿色发展指数进行对比,两种方法的评价结果排序有较好的一致性。这也间接表明了本研究的方法具有进行可持续发展水平评价的可行性。

参考文献 (References):

- [1] 孙晓,刘旭升,李锋,陶宇. 中国不同规模城市可持续发展综合评价. 生态学报, 2016, 36(17): 5590-5600.
- [2] 叶潇潇,赵一飞. 基于聚类分析的长江三角洲港口群可持续发展水平评价. 长江流域资源与环境, 2016, 25(S1): 17-24.
- [3] 黄志烨,李桂君,李玉龙,常远. 基于 DPSIR 模型的北京市可持续发展评价. 城市发展研究, 2016, 23(9): C20-C24.
- [4] 刁丽琼,廖和平,秦伟山. 基于能值分析的山西省生态经济系统可持续发展评价. 水土保持通报, 2011, 31(3): 175-179.
- [5] 张建勇,赵艳玲,付亚洁,何厅厅,田帅帅,邹玉珠,刘慧芳. 基于能值-成本的资源型省域绿色 GDP 核算及可持续发展评价. 中国矿业, 2017, 26(9): 104-110.
- [6] 付桂军,齐义军. 煤炭资源型区域可持续发展水平比较研究—基于模糊综合评价法的分析. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 106-110.
- [7] 郝翠,李洪远,孟伟庆. 国内外可持续发展评价方法对比分析. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 161-166.
- [8] 窦睿音,刘学敏,张昱. 基于能值分析的陕西省榆林市绿色 GDP 动态研究. 自然资源学报, 2016, 31(6): 994-1003.
- [9] 郭慧文,严力蛟. 城市发展指数和生态足迹在直辖市可持续发展评估中的应用. 生态学报, 2016, 36(14): 4288-4297.
- [10] 马艳梅,吴玉鸣,吴柏钧. 长三角地区城镇化可持续发展综合评价——基于熵值法和象限图法. 经济地理, 2015, 35(6): 47-53.
- [11] 董锋,谭清美,周德群,龙如银,朱佳翔. 资源型城市可持续发展水平评价——以黑龙江省大庆市为例. 资源科学, 2010, 32(8): 1584-1591.
- [12] Birgé H E, Allen C R, Garmestani A S, Pope K L. Adaptive management for ecosystem services. Journal of Environmental Management, 2016, 183: 343-352.
- [13] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [14] Farley J, Voinov A. Economics, socio-ecological resilience and ecosystem services. Journal of Environmental Management, 2016, 183: 389-398.
- [15] Capra F. The Web of Life: A New Scientific Understanding of Living Systems. New York: Anchor, 1996.
- [16] Carpenter S, Walker B, Anderies M, Abel N. From metaphor to measurement: resilience of what to what? Ecosystems, 2001, 4(8): 765-781.
- [17] Ko J Y, Day J W, Lane R R, Day J N. A comparative evaluation of money-based and energy-based cost-benefit analyses of tertiary municipal wastewater treatment using forested wetlands vs. sand filtration in Louisiana. Ecological Economics, 2004, 49(3): 331-347.
- [18] Odum H T. Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making. New York: Wiley, 1996.
- [19] 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. Florida, USA: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2000.
- [20] Jørgensen S E. Parameters, ecological constraints and exergy. Ecological Modelling, 1992, 62(1/3): 163-170.
- [21] Jawad H, Jaber M Y, Bonney M. The economic order quantity model revisited: an extended exergy accounting approach. Journal of Cleaner Production, 2015, 105: 64-73.
- [22] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. Ecological Modelling, 2004, 178(1/2): 201-213.
- [23] Zhou L, Duan M S, Yu Y D. Exergy and economic analyses of indirect coal-to-liquid technology coupling carbon capture and storage. Journal of

- Cleaner Production, 2018, 174: 87-95.
- [24] Hau J L, Bakshi B R. Expanding exergy analysis to account for ecosystem products and services. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38 (13): 3768-3777.
- [25] Ukidwe N U, Bakshi B R. Thermodynamic accounting of ecosystem contribution to economic sectors with application to 1992 U.S. economy. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(18): 4810-4827.
- [26] Dong X B, Ulgiati S, Yan M C, Zhang X S, Gao W S. Energy and exergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China. *Energy Policy*, 2008, 36(10): 3882-3892.
- [27] Lu H F, Bai Y, Ren H, Campbell D E. Integrated exergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvial paddy fields: implications for agricultural policy in China. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(12): 2727-2735.
- [28] Li L J, Lu H F, Ren H, Kang W L, Chen F P. Exergy evaluations of three aquaculture systems on wetlands surrounding the pearl river estuary, China. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 526-534.
- [29] Jiang M M, Chen B, Zhou J B, Tao F R, Li Z, Yang Z F, Chen G Q. Exergy account for biomass resource exploitation by agriculture in China. *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4704-4719.
- [30] Geng Y, Zhang P, Ulgiati S, Sarkis J. Exergy analysis of an industrial park: the case of Dalian, China. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(22): 5273-5283.
- [31] Wang L M, Li W D, Li Z. Exergy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP Plant EIP). *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(1): 56-70.
- [32] Bakshi B R. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 2002, 26 (2): 269-282.
- [33] Goedkoop M, Spriensma R. The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. Amersfoort: PRé Consultants B. V., 2000.
- [34] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, van Zelm R. ReCiPe 2008-A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonized Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. University of Leiden, Radboud University Nijmegen, RIVM, Bilthoven, Amersfoort, Netherlands, 2009.
- [35] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [36] Cambell D E, Brandt-Williams S L, Meisch M E A. Environmental Accounting Using Exergy: Evaluation of the State of West Virginia. Narragansett, RI, USA: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005.
- [37] 中华人民共和国国家统计局. 统计数据. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201712/t20171226_1566827.html. 2017-12-26.