

# “全碳排”核算与碳绩效评价方法研究

张雪花<sup>1,†</sup> 李响<sup>1</sup> 叶文虎<sup>2</sup> 张宝安<sup>3</sup>

1. 天津工业大学环境经济研究所, 天津 300387; 2. 北京大学中国持续发展研究中心, 北京 100871;  
3. 中国环境管理干部学院, 秦皇岛 066004; † E-mail: xuehua671231@163.com

**摘要** 提出“全碳排”核算方法, 其核算账户包括能源消耗碳排放、生物质资源消费潜在碳耗用和废弃物排放潜在碳耗用; 以太阳能值为量纲归一化工具, 进行全碳排放量核算; 以全碳排核算为基础, 综合考虑单位碳排放人口承载力、单位碳排放经济产出量和单位碳排放人均可支配收入获取量等信息, 构建能够反映碳效率和发展协调度的碳排放绩效综合指数, 以衡量一个地区的碳绩效。以北京市和重庆市为例, 评价 2001—2011 年间的碳排放综合绩效。结果显示: 两个城市的能源消耗碳排放在全碳排总量中所占比重不断上升, 可见即使从全碳排视角来看, 能源消费仍是影响碳排放的最主要因素; 两个城市三个方面的分指标值差异较大, 可见不同的生产水平对碳排影响不容忽视; 较之仅考虑能源碳排及碳生产率的传统碳效率评估, 基于“全碳排”核算的碳综合绩效评价, 可以更为公平客观地反映一个地区的碳绩效, 为地区碳减排责任认定提供科学参考。

**关键词** 全碳排核算; 碳绩效评价; 能值转换; 碳减排责任

**中图分类号** X820; F205

## Calculation of Full Carbon Emission and Evaluation of Carbon Emission Performance

ZHANG Xuehua<sup>1,†</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, YE Wenhua<sup>2</sup>, ZHANG Baoan<sup>3</sup>

1. Department of Environmental Economics, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387; 2. China Sustainable Development Research Center, Peking University, Beijing 100871; 3. Environmental Management College of China, Qinhuangdao 066004;  
† E-mail: xuehua671231@163.com

**Abstract** A full carbon emission calculation method is proposed, whose accounts include energy consumption carbon emission, potential carbon consumption of biomass resource consumption, and potential carbon consumption of waste emission. The solar energy is used as a tool of the same normalized dimension for calculating the amount of full carbon emission. Based on the full carbon emission calculation, population carrying capacity of one unit carbon emission, economic output of one unit carbon emission, and per capita disposable income of one unit carbon emission are considered into one package to construct an index to evaluate the carbon efficiency and development coordination level of a region, and the index is named carbon emission performance integrated index. Taking Beijing and Chongqing as examples, an assessment is made from 2001 to 2011 with the result that the proportion of energy consumption carbon emission in the full carbon emission of the two cities is raised continuously, which indicates that even in the view of full carbon emission, energy consumption is still the main factor affecting carbon emission; however, the effects from modes of both life and production on carbon emission also cannot be neglected. Compared with the traditional carbon efficiency evaluation with only energy carbon emission and carbon production rate considered, the carbon integrated performance evaluation based on “full carbon emission calculation” can fairly and objectively reflect carbon performance of a region, thus it provides a scientific method to identify the responsibility of regional carbon emission reduction.

**Key words** full carbon emission calculation; carbon performance evaluation; energy transmission; responsibility of carbon emission reduction

自 1970 年以来,地球表面气温已经上升了 0.6°C。历史上最热的 25 个年份均出现在 1980 年以后,其中有 10 个年份出现在 1996 年以后<sup>[1]</sup>。2005 年,全球碳计划<sup>[2]</sup>发起城市与区域碳管理计划,从城市—区域—全球的视角,将碳管理渗入到城市发展、城市部门和地方的实际工作中,主要目的是实现城市的可持续发展。为了减缓气候变化的速度,减少碳排放迫在眉睫,碳减排责任的认定成为世界性热门议题。

当前,国内外通常用碳排总量(目前仍以能源消耗碳排放计量为主)或碳生产率(某一特定区域生产总值与 CO<sub>2</sub> 排放量之比)来衡量一个国家或地区碳绩效或者说低碳化水平<sup>[3-4]</sup>。例如, Mielnik 等<sup>[5]</sup>提出碳指数(单位能源消费的碳排放),将其作为发展中国家应对气候变化及经济发展模式评价的主要指标; Ang<sup>[6]</sup>将能源强度(单位 GDP 的能源消费量)作为主要考量指标,分析人类行为对气候变化的影响; Sun<sup>[7]</sup>则认为,碳排放强度(单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放量)是评价一个国家或地区碳减排效果的理想指标; Zhang 等<sup>[8]</sup>认为,工业化累计人均碳排放量和单位 GDP 排放量更能体现公平、合理的原则。以上研究聚焦于 GDP 产出与 CO<sub>2</sub> 排放量之间的相关分析,即碳的生产效率分析,没有反映人均碳占用(或称碳耗用)情况。碳足迹可以反映一个国家或地区能源意识和行为对自然界产生的影响<sup>[9-10]</sup>,但没有体现单位碳排的经济产出能力。

事实上,从福利绩效<sup>[11-12]</sup>和发展的公平性<sup>[13-14]</sup>视角来看,将经济产出、人口承载和民众生活水平等因素共同融入碳排放绩效分析,才能够更为客观地评价一个国家或地区的碳绩效,也便于在大尺度减排目标确定的前提下,公平地核定某个国家或地区的减排指标。

此外,生物质资源生产需要占用土地,从某种程度上侵占了高固碳植物的种植机会;废弃物排放过多会导致环境质量下降,污染治理需要消耗资源并且排碳。因此,单一的能源消耗碳排放并不能全面反映一个地区的整体碳耗用情况。正在兴起的隐含碳计算方法<sup>[15-16]</sup>通过投入/产出分析来核算区域碳排放总量,从某种程度上弥补了上述不足,但由于不同种类产品的“碳排系数”难于确定,该方法账户覆盖仍不全面。

为了反映全要素碳排放综合绩效的思想,不同于以往研究中以“能源消耗碳排放”为主的窄口径碳

计量方法,本文以上述研究为基础,基于系统整体性,综合考量碳排放与潜在碳耗用<sup>[17]</sup>,开发“全碳排”核算方法。不同于以往研究中以“单位 GDP 的碳排放强度”<sup>[18-19]</sup>或“单位碳排人口承载”<sup>[20-21]</sup>为主的单点式评价思路,从单位碳排经济产出、人口承载和人均福利支撑三方面,构建碳排放综合绩效指数,评价一个地区的碳排放绩效。

## 1 “全碳排”核算方法

### 1.1 “全碳排”核算的概念框架

“全碳排”核算旨在更加客观地反映生活生产的全过程对碳排放量的影响,包括碳排放和潜在碳耗用。全碳排核算的概念框架如下。

步骤 1: 建立“全碳排”核算账户。

分析生产生活碳排放或潜在碳耗用的关键环节,建立“全碳排”核算账户。

本文在传统能源消耗碳排放核算的基础上,增设生物质资源消费潜在碳耗用和废弃物排放潜在碳耗用核算。这样,全碳排核算账户由三部分组成,即能源消耗碳耗用、生物质资源消费碳耗用和废弃物排放碳耗用。

步骤 2: 找到不同账户碳耗用的计算方法。

能源消耗直接排放碳,有成熟的计算方法,而其他账户是潜在的碳耗用,目前还没有较为成熟的计算方法。因此,将潜在碳耗用与碳排放建立联系并统一度量是“全碳排”核算首先要解决的难题,能值分析为解决这一难题提供了有效途径。

本文应用能值分析理论与方法,通过能值转换,核算所列三项账户的碳排放或潜在碳耗用。

步骤 3: 全面核算碳耗用量。

以上述步骤为基础,分账户核算碳耗用量,再求和。

### 1.2 能值分析与账户建立

能值分析理论与方法由美国生态学家 Odum<sup>[22]</sup>提出。Odum 的能值(Emergy)定义为,一种流动或贮存的能量中所包含的另一种类别能量的数量,称为该能量的能值<sup>[23]</sup>。因为任何形式的能量均源于太阳能,故以太阳能值为基准衡量单位<sup>[24]</sup>。任何资源、环境、产品或劳务形成所需的直接和间接应用的太阳能之和,就是其所具有的太阳能值,单位为太阳能焦耳(sej)<sup>[25]</sup>。可以说,资源能源生产过程中所耗用的其他种类物质的能量越多,该种资源单位质量所对应的能值量就越高<sup>[26]</sup>。

能值是能量统一化标度后的一种形式。能量转化定律指出,任何能量在做功或存储过程中均会有消散流失的现象,即有部分能量将转化为热能而消散,从而失去潜在的做功能力<sup>[27]</sup>。这部分流失的能量排放到环境中就产生环境污染,消纳或降解这部分污染物需要进一步消耗能量排碳,这就是潜在的碳耗用<sup>[28]</sup>。

十分之一法则指出,在生态系统能量流动过程中,从一个营养层到下一个营养层,约有10%的能量传递,90%的能量被以热能的形式耗散<sup>[29-30]</sup>。由此可知,维持相同的生活所需,肉、蛋、奶类消耗越多(或者说蔬、果、谷类消耗越少),生物质资源消费的整体有效功就越少,生产过程所需土地就越多。这种定向生产所占用的土地越多,高固碳植物生长土地就越少,因此是一种潜在的碳耗用。

根据以上分析,本文将能源消耗碳排放、生物质资源消费潜在碳耗用和废弃物排放潜在碳耗用纳入“全碳排”核算账户。

### 1.3 基于能值的碳耗用核算

#### 1.3.1 子账户划分

能源消耗、生物质资源消费和废弃物排放为三个大类账户,要计算每大类账户的碳耗用,必须将其分别细分,建立子账户。为了便于统计数据的获取,本文账户细分力求与统计年鉴口径一致。

第一部分,能源消费。将能源消费分为煤、油品、气、电力及其他等5个子账户。其中煤包括原煤、洗精煤、焦炭等;油品包括原油、汽油、柴油、煤油、燃料油等;气包括焦炉煤气、液化石油气、天然气等;其他包括热力等。

第二部分,废弃物的排放。废弃物分为工业固废、生活垃圾、工业废水和工业废气。

第三部分,生物质资源消费。生物质资源消费以生物产品消费统计为主,主要分为农产品(粮食、食用油、蔬菜、水果等)、畜产品(猪牛羊肉、家禽、鸡蛋、牛奶等)和水产品三部分。

#### 1.3.2 基于能值的碳耗用核算

基于能值的碳耗用基本过程为:原始数据→能量→太阳能值→电能→标煤→碳排量。

首先,将物质转换成相应的能量,把不同种类和不可比较的物质以实物为单位,乘以能量折算系数(即单位物质所具备的能量);然后,将所得到的不同类型、不同等级的能量乘以能值转换率(不同

种类物质所对应不同等级的单位能量所具有的太阳能值,单位  $\text{sej/J}$ ),换算成可以直接进行比较的太阳能值;最后,借助电能的能值转换率,将各项目的太阳能值换算成电能,再由电能转化为标准煤,从而计算出研究区域的碳排放(包括潜在碳耗用)总量。计算公式如下:

$$\text{CO}_2 = \sum \text{CO}_{2k} = \sum \frac{P_{kh} \times \alpha \times \beta}{\gamma} \times \frac{0.8856}{3600000}, \quad (1)$$

其中,  $\text{CO}_{2k}$  表示第  $k$  类(包括能源消费量、生物资源消费量、废弃物排放量)物质消费过程中的碳排放量;  $P_{kh}$  表示第  $h$  类物质的第  $h$  种原始数据(其数值可直接在有关统计年鉴中获得);  $\alpha$  表示能量折算系数(数值来源于中国能源统计年鉴);  $\beta$  表示能值转换率(数值参照 Odum 的能值理论);  $\gamma$  表示电能的能值转化率( $1.05 \times 10^5 \text{ sej/J}$ ),  $1 \text{ kWh} = 3600000 \text{ J}$ , 每千瓦时供电排放  $0.8856 \text{ kg CO}_2$ 。

以上各账户基于能值的碳耗用核算过程基本相同,不同种类物质具有不同的能量折算系数和值转换率。 $P_{kh}$  数值可直接在有关统计年鉴中获得;  $\alpha$  数值可由中国能源统计年鉴查到;  $\beta$  数值以 Odum 提出的能值理论为基础,参考已有文献<sup>[31-38]</sup>总结而得,不同物质的  $\alpha$  和  $\beta$  数值详见附录 1 和 2。

## 2 碳排放绩效综合指数构建

碳排放绩效综合指数包括 3 个分指标:单位碳排放 GDP 产出量,用以体现单位碳的经济产出能力;单位碳排人口承载量,用以体现单位碳的人口承载能力;单位碳排人均可支配收入,用以体现单位碳的福利增进能力。综合指数构建的基本程序如下:首先,将单位碳排放的 GDP 产出量(表征单位碳排所支撑的经济生产能力)和单位碳排放的人口承载量(表征单位碳排的人口支撑能力)及单位碳排放的人均可支配收入(表征单位碳排的经济福利支撑能力)进行无量纲化;然后,应用协调度函数处理方法,计算三者的协调度;最后,综合考虑协调度情况及 3 个分指标值的大小,将三者合成一个综合指标——碳排放绩效综合指数;计算碳排放绩效综合指数。

### 2.1 指标无量纲化

首先,对单位  $\text{CO}_2$  的 GDP 产出量采用极差标准化方法进行无量纲化处理,计算公式如下:

$$\text{CO}_{2G_y} = \frac{\text{GDP}_j / \text{CO}_{2ij} - \text{MinCO}_{2G}}{\text{MaxCO}_{2G} - \text{MinCO}_{2G}}, \quad (2)$$

式中,  $CO_{2Gij}$  代表第  $i$  个样本城市第  $j$  年单位  $CO_2$  的 GDP 产出量分指标的标准化数值,  $CO_{2ij}$  代表第  $i$  个样本城市第  $j$  年的  $CO_2$  排放量,  $GDP_{ij}$  代表第  $i$  个样本城市第  $j$  年的地区生产总值,  $MaxCO_{2G}$  为  $i$  个样本城市  $j$  年内的年单位  $CO_2$  的 GDP 产出量最大值,  $MinCO_{2G}$  为  $i$  个样本城市  $j$  年内的年单位  $CO_2$  的 GDP 产出量最小值的 0.9 倍。由于协调度公式中需要用到乘法, 为避免极端情况零值出现, 上述公式中的最小值取实际最小值的 0.9 倍。

然后, 将单位  $CO_2$  的人口承载量采用极差标准化方法进行无量纲化处理, 计算公式如下:

$$CO_{2Pij} = \frac{P_{ij}/CO_{2ij} - MinCO_{2P}}{MaxCO_{2P} - MinCO_{2P}}, \quad (3)$$

式中,  $CO_{2Pij}$  代表第  $i$  个样本城市第  $j$  年单位  $CO_2$  排放承载的人口量分指数,  $CO_{2ij}$  表示第  $i$  个样本城市第  $j$  年的  $CO_2$  排放量,  $P_{ij}$  表示代表第  $i$  个样本城市第  $j$  年的人口数量,  $MaxCO_{2G}$  为  $i$  个样本城市  $j$  年内的年单位  $CO_2$  人口承载量最大值,  $MinCO_{2G}$  为  $i$  个样本城市  $j$  年内的年单位  $CO_2$  人口承载量最小值的 0.9 倍。

同理, 将单位  $CO_2$  的人均可支配收入最大值记为  $MaxCO_{2I}$ , 最小值记为  $MinCO_{2I}$ 。采用极差标准化方法进行无量纲化处理, 计算公式如下:

$$CO_{2Iij} = \frac{I_{ij}/CO_{2ij} - MinCO_{2I}}{MaxCO_{2I} - MinCO_{2I}}, \quad (4)$$

式中,  $CO_{2Iij}$  代表第  $i$  个样本城市第  $j$  年单位  $CO_2$  的人均可支配收入量分指数,  $CO_{2ij}$  表示第  $i$  个样本城市第  $j$  年的人均可支配收入,  $MaxCO_{2G}$  为  $i$  个样本城市  $j$  年内的年单位  $CO_2$  人均可支配收入最大值,  $MinCO_{2G}$  为  $i$  个样本城市  $j$  年内的年单位  $CO_2$  人均可支配收入最小值的 0.9 倍。

## 2.2 协调度计算

协调发展不追求区域或城市社会经济环境复杂系统的单个要素的最优, 而是从系统全局的视角, 强调系统多个要素间的和谐及系统整体及效益效率的最佳<sup>[39]</sup>。因此, 本文借鉴协调度模型<sup>[40]</sup>, 构建碳排放绩效协调度函数, 反映系统社会、经济、环境不同目标之间的发展协调性。

首先, 计算以上 3 个分指标的均权值:

$$S_{ij} = \frac{1}{3}(CO_{2Gij} + CO_{2Pij} + CO_{2Iij}), \quad (5)$$

式中,  $S_{ij}$  为第  $i$  个样本城市第  $j$  年 3 个分指标的均权值, 体现的是不考虑发展协调度情况下的碳绩效情况。

然后, 计算 3 个分指标之间的协调度:

$$D_{ij} = \frac{\sqrt[3]{CO_{2Gij} \times CO_{2Pij} \times CO_{2Iij}}}{S}, \quad (6)$$

式中,  $D_{ij}$  为第  $i$  个样本城市第  $j$  年的发展协调度 ( $0 \leq D \leq 1$ ), 其值越大, 表示 3 个指标之间的协调关系越好, 反之则相反。

## 2.3 碳排放绩效综合指数的计算

以上述计算结果为基础, 设计碳排放绩效综合指数测算公式如下:

$$CO_{2Zij} = \sqrt{D_{ij} \times S_{ij}}, \quad (7)$$

式中  $CO_{2Zij}$  为  $i$  个样本城市第  $j$  年的碳排放绩效综合指数, 其余符号同上。

## 3 应用研究

本文选取北京和重庆两个城市进行对比研究。文中所用基本数据源自《2002—2012 年北京市统计年鉴》、《2002—2012 年重庆市统计年鉴》以及《2002—2012 年中国能源统计年鉴》。根据式(1)计算得到两个城市 2001—2011 年“全碳排”总量, 除以对应年份的城市常住人口, 就得到年人均“全碳排”数值。计算过程中, GDP 及人均可支配收入用的是 2000 年的不变价, 结果如表 1 所示。

### 3.1 碳绩效排放综合指数计算

计算两个城市的 2001—2011 年间的单位碳排放的 GDP 产出量、单位碳排放的人口承载量和单位碳排放的人均可支配收入, 根据式(2)~(4)进行无量纲化处理, 根据式(5)~(7)计算碳排放绩效分指标值、协调度值及碳排放绩效综合指数值, 结果如图 1 所示。

### 3.2 计算结果分析

从表 1 可知, 两个城市能源消耗碳排在全碳排总量中所占比重都处于上升趋势。由此说明, 即使即从全碳排视角来看, 能源消费仍是影响碳排放的最主要因素, 而且发展越成熟的城市, 所占比重变化幅度就越小。

纵观表 1 及图 1(a), (b)和(c), 两个城市的碳绩效分指标存在较大差异。单位碳排 GDP 产出量 ( $CO_{2G}$ )北京市增长显著; 重庆市增长相应较慢。由

表 1 北京和重庆人均“全碳排”(2001—2011 年)  
Table 1 Per capita “full carbon emission” of Beijing and Chongqing (2001–2011)

年份	人均“全碳排”量/ $10^8$ sej		能源碳排比重/%		废弃物碳排比重/%		生物质资源碳排比重/%	
	北京	重庆	北京	重庆	北京	重庆	北京	重庆
2001	3.4	3.2	85	60	3	5	12	35
2002	3.7	3.2	86	61	3	5	11	34
2003	4.1	3.2	86	65	3	5	11	29
2004	4.4	3.4	88	67	3	5	10	28
2005	4.8	4.1	87	69	2	5	10	26
2006	5.2	4.4	88	72	3	5	10	23
2007	5.6	4.7	88	75	2	4	9	21
2008	5.9	4.9	88	77	2	4	9	19
2009	6.2	5.3	88	77	2	4	10	19
2010	6.6	5.9	88	78	2	4	10	18
2011	6.7	6.8	87	82	2	3	11	14

表 1 可知,北京市资源利用水平和生产率较高,废弃物排放量较低,而重庆市生产率相对较低,废弃物排放量相对较高。可见,不同的生产方式对碳排放量和碳生产效率影响很大。单位碳排人口承载量( $CO_{2p}$ )重庆市初始水平很高,但呈明显下降趋势;北京初始水平较低,但总体趋势较为平稳,下降幅度小。因此,重庆市这项分指标的优势越来越不明显。单位碳排放人均可支配收入( $CO_{2i}$ )北京市优于重庆市,说明北京市的碳福利产出效率较高。

由图 1(d)可知,从 3 个分指标的均权值(碳效率的绝对量)来看,2001 年北京市高于重庆,上升趋势明显;重庆波动较大,整体处于下降状态。由图 1(e)可知,3 个分指标的协调度重庆市上升趋势明显,北京市有所下降。如果要提高协调度水平,北京市单位  $CO_2$  人口承载能力应有所提高。由图 1(f)可知,从碳排放综合绩效来看,北京一直较高,但由于重庆市增长幅度大,2011 年已经与北京市非常接近。

不同的评价体系会对应不同的减排指标分配策略。如果仅从单位碳排人口承载能力来考虑,优惠政策应该向重庆这类发展中城市倾斜;如果仅从单位碳排经济产出水平来考虑,优惠政策会向北京这类发展较为成熟的城市倾斜;如果仅从单位碳排社会经济福利绩效来考虑,优惠政策也会向北京这类发展较为成熟的城市倾斜。三项分指标体现了碳排放在三个不同方面的绩效情况,碳排放综合绩效

指数即可以体现碳在三个方面的绝对效率,又能体现三个方面的协调度,因此,可以更好地反映城市或区域碳效率水平及社会经济环境发展协调度。从另外一个角度看,从碳福利绩效相对公平和碳生产率提高及空间优化上,碳排放综合绩效指数可以为区域碳减排责任的认定提供科学参考。

#### 4 结论与讨论

本文提出的“全碳排”概念及其核算方法,考虑了生产生活中所消费的能源碳排放、生物质资源消耗潜在碳耗用和废弃物排放的潜在碳耗用。由于引入了能值理论与方法,使三种不同类型的碳占用得以用同一量纲进行统一核算和度量,为全面核算某一地区的碳耗用和客观地反映不同的生产生活方式对碳排放总量的影响提供了一种有效方法。

以“全碳排”核算为基础,综合考虑单位碳排人口承载量、单位碳排经济产出量和单位碳排人均可支配收入获取量等信息,构建能够反映碳效率和发展协调度的碳排放绩效综合指数,用以衡量一个地区碳绩效。实例研究结果显示,基于“全碳排”核算的碳排放绩效综合评价,既能体现各分要素效率对碳排放综合绩效的贡献,也能体现指标间的协调关系对碳排放综合效率的影响,较之仅考虑能源碳排放及碳生产率的传统碳效率评估,可以更为公平客观地反映一个地区的碳绩效和低碳化水平,为区域碳减排责任的认定提供了一种新思路。

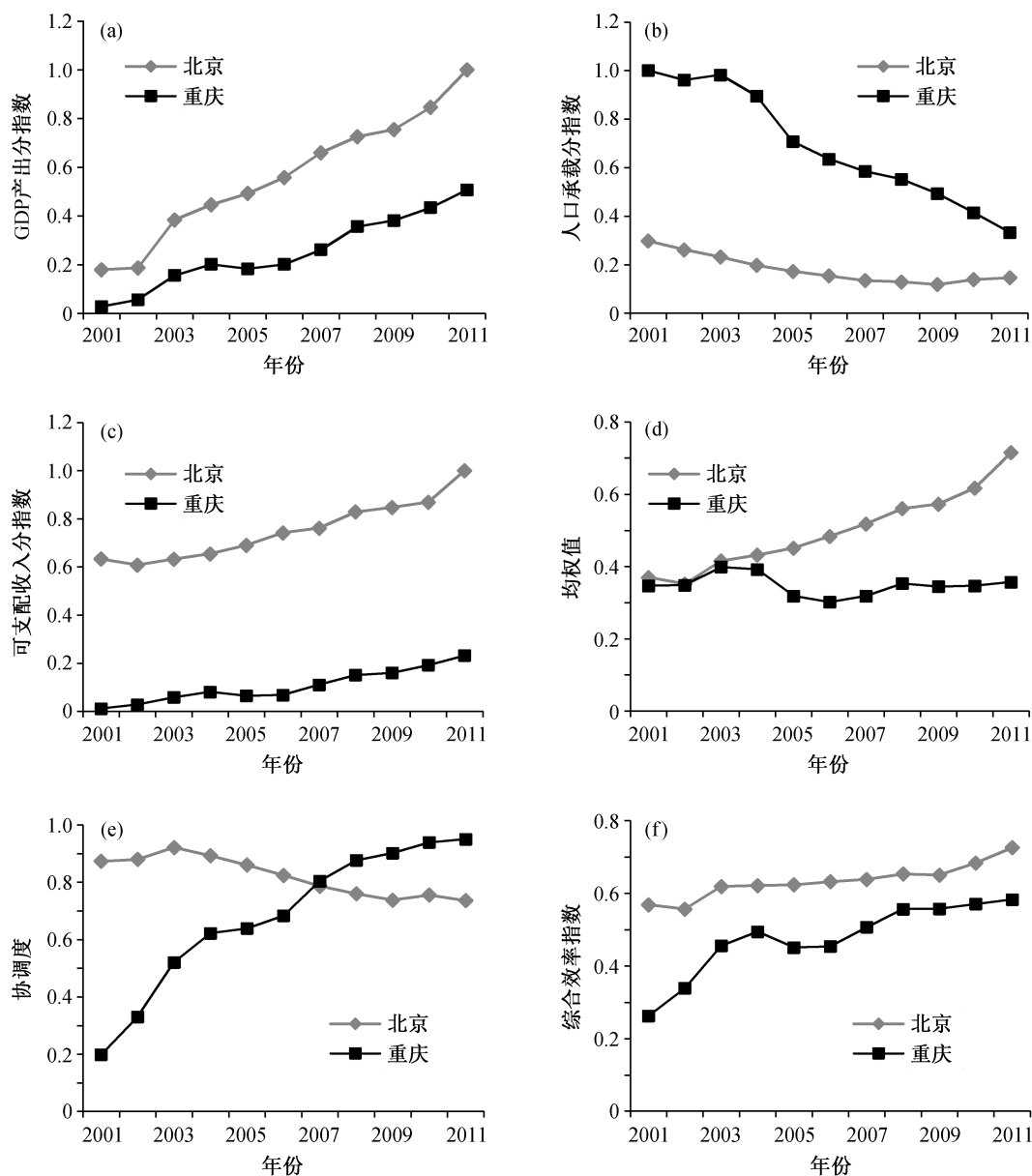


图 1 北京和重庆碳排放绩效评价结果(2001—2011 年)  
Fig. 1 Carbon performance index of Beijing and Chongqing (2001—2011)

“全碳排”核算旨在更为客观地反映不同的生产生活方式对碳排放量的影响和人均碳占用(或称碳足迹)情况。本文提出这个新概念,并且在传统的以能源碳排为主的计量方法的基础上,增加了生物质资源消耗潜在碳耗用和废弃物排放的潜在碳耗用两个账户,表达的是一种“全碳排”计量的新思路。我们相信,随着研究的不断深入,全碳排核算账户会被继续丰富和完善,不同种类生物质资源与高固碳植物固碳能力之差也将计量得更为精细。如果能将时间累积因素的影响<sup>[41]</sup>也融入“全碳排”核算之

中,可以使“全碳排”不仅具备静态之全,更具备动态之全。

### 参考文献

[1] 布朗·B. 模式 4:0: 起来,拯救文明. 上海: 上海科技教育出版社, 2010: 63-65  
[2] Urban and Regional Carbon Management. What is urban and regional carbon management? [EB/OL] (2013-03-13) [2014-05-16]. <http://www.gcp-urcm.org/Main/HomePage>

- [3] 朱远, 刘国平. “金砖四国”碳排放绩效比较研究. 亚太经济, 2011(5): 78–83
- [4] 王萱, 宋德勇. 碳排放阶段划分与国际经验启示. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(5): 46–51
- [5] Mielnik O, Goldemberg J. Communication the evolution of the “carbonization index” in developing countries. *Energy Policy*, 1999, 27(5): 307–308
- [6] Ang B W. Is the energy intensity a less useful indicator than the carbon factor in the study of climate change?. *Energy Policy*, 1999, 27(15): 943–946
- [7] Sun J W. The decrease of CO<sub>2</sub> emission intensity is decarbonization at national and global levels. *Energy Policy*, 2005, 33(8): 975–978
- [8] Zhang Z, Qu J, Zeng J. A quantitative comparison and analysis on the assessment indicators of greenhouse gases emission. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(4): 387–399
- [9] Edgar G H, Glen P P. Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(16): 6414–6420
- [10] 潘家华, 庄贵阳, 郑艳, 等. 低碳经济的概念辨识及核心要素分析. 国际经济评论, 2010(4): 88–101
- [11] 诸大建. 中国低碳经济蓝皮书. 上海: 同济大学出版社, 2012
- [12] 臧漫丹, 诸大建, 刘国平. 生态福利绩效: 概念、内涵及 G20 实证. 中国人口·资源与环境, 2013, 5: 118–124
- [13] Tungodden B. Responsibility and redistribution: the case of first-best taxation. *Social Choice and Welfare*, 2005, 24: 33–44
- [14] 吴静, 马晓哲, 王铮. 我国省市自治区碳排放权配额研究. 第四纪研究, 2010, 30(3): 481–488
- [15] Munksgaard J, Pedersen K A. CO<sub>2</sub> accounts for open economies: producer or consumer responsibility?. *Energy Policy*, 2001, 29(4): 327–334
- [16] Shui B, Harriss R C. The role of CO<sub>2</sub> embodiment in US-China trade. *Energy Policy*, 2006, 34(18): 4063–4068
- [17] Zhang X H, Li L, Li J, et al. Calculation model of “full carbon efficiency” based on emergy. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2012, 4(23): 525–530
- [18] 王智新, 梁翠, 赵景峰. 科技投入绩效、制度环境与碳排放强度. 科学管理研究, 2012, 30(6): 109–112
- [19] 王伟林, 黄贤金. 区域碳排放强度变化的因素分解模型及实证分析: 以江苏省为例. 生态经济, 2008 (12): 32–35
- [20] 陈武, 常燕, 李云峰. 中国碳足迹的国际比较研究. 中国科技论坛, 2013, (3) 138–144
- [21] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 28–34
- [22] Odum H T. Self-organization, transformity and information. *Science*, 1988, 242: 1132–1139
- [23] Odum H T. *Environmental accounting: EMERGY and environmental decision making*. New York: John Wiley & Sons, 1996
- [24] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Energy Use, environmental loading and sustainability: an energy analysis of Italy. *Ecological Modelling*, 1994, 73: 215–268
- [25] 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
- [26] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emergy — a case study of the Chinese society. *Ecological Modelling*, 2006, 198: 101–114
- [27] Valsson T, Ulfarsson G F, Gardarsson S M. A theory of the evolution of settlement structures based on identification and use of patterns: Iceland as a case study. *Futures*, 2013, 54 (11): 19–32
- [28] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析方法的都市代谢过程研究: 理论与方法. 生态学报, 2013, 33(15): 4539–4551
- [29] 李宏. 大自然的报复. 沈阳: 辽海出版社, 2013
- [30] Cuéllar A D, Webber M E. Wasted food, wasted energy: the embedded energy in food waste in the United States. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(16): 6464–6469
- [31] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态·环境与生态工程丛书: 生态经济系统能. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [32] 陆宏芳, 沈善瑞, 陈洁, 等. 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
- [33] 张雪花, 李建, 张宏伟. 基于能值-生态足迹整合模型的城市生态性评价方法研究: 以天津市为例. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(2): 344–352
- [34] 张延安, 郑昭佩, 张文岚. 基于能值改进的生态足迹模型在济南市的应用分析. 资源环境与发展, 2010(1): 27–31
- [35] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001, 37: 229–255
- [36] Common M S, Salma U. Accounting for changes in Australian carbon dioxide emissions. *Energy Econ*, 1992, 14: 217–225

- [37] Daniels P L. Barriers to sustainable development in natural resource-based economies: Australia as a case study. *Soc Nat Resources*, 1992, 5: 247–262
- [38] Darwin R, Tsigas M, Lewandrowski J, et al. Land use and cover in ecological economics. *Ecol Econ*, 1996, 17: 157–181
- [39] 李雨潼. 基于3E 协调度分析的黑龙江省低碳经济发展路径研究. *求是学刊*, 2013, 40(1): 73–79
- [40] 潘文砚, 王宗军. 基于协调度模型的低碳竞争力评价指标体系研究. *情报杂志*, 2012, 31(10): 76–82
- [41] 王少鹏, 朱江玲, 岳超, 等. 碳排放与社会经济发展: 碳排放与社会发展 II. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(4): 505–509

附录 1 能量折算系数  $\alpha$

生物资源产品			能源产品		
名称	单位	数值/ $10^6$	名称	单位	数值/ $10^4$
粮食	J/kg	15.90	原煤	kJ/kg	2.09
蔬菜及制品	J/kg	2.50	焦炭	kJ/kg	2.85
食用植物油	J/kg	38.60	原油	kJ/kg	4.19
猪肉	J/kg	20.00	汽油	kJ/kg	4.31
牛肉	J/kg	11.70	煤油	kJ/kg	4.31
羊肉	J/kg	14.10	柴油	kJ/kg	4.27
家禽	J/kg	5.50	燃料油	kJ/kg	4.19
蛋类及制品	J/kg	8.40	天然气	kJ/m <sup>3</sup>	3.56
奶及其制品	J/kg	2.90	电力	kJ/kwh	1.18
水产品	J/kg	5.50			
水果及制品	J/kg	3.30			
食糖	J/kg	15.90			

附录 2 能值转化率  $\beta$

生物资源产品			能源产品			废弃物		
名称	单位	数值/ $10^4$	名称	单位	数值/ $10^4$	名称	单位	数值/ $10^{12}$
小麦	sej/J	6.80	原煤	sej/J	3.98	废水	sej/t	4.94
蔬菜及制品	sej/J	2.70	焦炭	sej/J	5.01	废气	sej/m <sup>3</sup>	0.00132
食用植物油	sej/J	130	原油	sej/J	5.40	生活垃圾	sej/t	445
猪肉	sej/J	170	汽油	sej/J	6.60	工业固废	sej/t	150
牛肉	sej/J	400	煤油	sej/J	6.60			
羊肉	sej/J	200	柴油	sej/J	6.60			
家禽	sej/J	170	燃料油	sej/J	6.60			
蛋类及制品	sej/J	200	天然气	sej/J	4.80			
玉米	sej/J	2.70	热力	sej/J	8.00			
水产品	sej/J	200	电力	sej/J	16.0			
水果及制品	sej/J	8.90						
食糖	sej/J	8.50						