

# 区域能源碳足迹计算模型比较研究

## ——以湖北省为例

邓宣凯<sup>1</sup>, 刘艳芳<sup>1,2\*</sup>, 李纪伟<sup>1</sup>

1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学教育部地理信息系统重点实验室, 湖北 武汉 430079

**摘要:** 能源消费排放是最主要的碳排放来源, 研究能源碳足迹重要理论和现实意义。如何准确计算和表征能源碳足迹的大小成为该研究领域的重要问题。在文献回顾的基础上, 文章总结了3种目前应用较广泛的计算区域能源消费碳足迹的方法和模型, 它们分别是碳汇法、净初级生产力改进模型和净生态系统生产力改进模型。分别介绍了其计算公式、输入参数和计算过程。以湖北省1998—2009年能源消费碳足迹的计算为例, 分别用这几种方法计算了能源消费碳足迹的总量和人均碳足迹。得到的主要结论有: 研究区域能源消费碳排放量增长较快, 3种方法和模型计算得到的碳足迹总量和人均量从时间序列上看, 整体变化趋势一致, 碳足迹亦呈现快速增长。但3种模型计算出的碳足迹大小差异较大, 碳汇法模型足迹最大, 净生态系统生产力改进模型次之, 净初级生产力改进模型结果最小, 并且碳汇法的计算结果明显大于其他两种模型。计算结果差异的原因在于, 传统碳汇法模型只考虑林地的碳吸收能力, 忽略了区域其他用地类型的碳吸收能力。净初级生产力改进模型考虑了各种用地类型的吸收能力, 但从生态系统来说忽略了异氧呼吸的碳释放, 高估了区域的碳吸收能力。几种模型都运用了固定值或者平均统计量, 未能考虑地域差异, 同时未考虑各统计量随时间和气候等变化而变化的可能, 存在一定的不合理性, 这也是今后研究值得深入研究的方向。

**关键词:** 能源; 碳足迹; 净初级生产力; 净生态系统生产力

**中图分类号:** X24

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2012) 09-1533-06

**引用格式:** 邓宣凯, 刘艳芳, 李纪伟. 区域能源碳足迹计算模型比较研究: 以湖北省为例[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1533-1538.

DENG Xuankai, LIU Yanfang, LI Jiwei. Comparative study on regional carbon footprint of energy consumption calculation models: A case study of Hubei Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1533-1538.

碳足迹源于生态足迹, 是在全球气候变化越来越受关注的大背景下应运而生的。关于碳足迹的研究, 近五年来已成为很多国家、非政府组织和研究者关注的热点, 相关研究也日益丰富<sup>[1-3]</sup>。碳足迹研究仍处于起步阶段, 需要进一步深入和探讨, 特别是碳足迹的区域差异研究还需要进一步加强<sup>[4-5]</sup>。国际上对碳足迹主要有两种解释: 一是将其定义为人类活动的碳排放量; 二是将碳足迹看作生态足迹的一部分: 即吸收化石燃料燃烧排放的二氧化碳所需的生态承载面积<sup>[6]</sup>。能源消费是被公认的最主要排放类型, 在工业国家占二氧化碳排放的90%以上, 温室气体总量的75%<sup>[7-8]</sup>。同理能源足迹在生态足迹中占很大比重, 是影响生态足迹大小的最主要因素, 亦是生态足迹中增长最快的<sup>[9]</sup>。按照第二种定义的解释, 能源消费的碳足迹反映了人类能源消费对生态空间的占用情况。作为可持续评价的关键指标之

一, 能源足迹是否客观准确地反映区域能源消费的生态环境影响, 已经成为广泛关注的焦点<sup>[10-11]</sup>。

如果按照第一种碳足迹的定义理解, 计算碳足迹的方法有很多, 比较典型的有投入产出法和生命周期评价法。投入产出法适于宏观层面, 但我国投入产出表五年一编, 数据难以获取。生命周期评价法适于微观产品层面, 但生命周期阶段和边界难以界定。针对区域碳足迹而言, 以上方法都显得不太适用。

目前在计算一个区域能源碳足迹模型中, 碳汇法仍是比较普遍的模型, 该模型也可以认为是由生态足迹模型中计算能源足迹的模型演变而来。其能源因子还是由林地的碳吸收能力计算得到。已有研究认为计算能源碳足迹时不应该只考虑林地的碳吸收能力, 要综合考虑研究区域内所有土地利用类型的碳吸收能力<sup>[12]</sup>。在此基础上, 也有学者尝试采

**基金项目:** 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAJ22B02); 中国博士后科学基金项目 (2012M511679)

**作者简介:** 邓宣凯(1983年生), 男, 博士研究生, 主要从事土地利用和碳循环研究。E-mail: xuankdeng@gmail.com

\*通信作者: 刘艳芳(1959年生), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事区域规划与地理信息系统应用工程研究。E-mail: yfliu610@163.com

**收稿日期:** 2012-07-23

用一些改进模型来计算能源消费的碳足迹,其中比较有代表的改进模型有两种:一是尝试用区域净初级生产力来代替区域的碳吸收能力<sup>[13-14]</sup>。二是尝试用净生态系统生产力来代替区域的碳吸收能力<sup>[6]</sup>。本文详细介绍了这几种模型的计算公式和计算参数,以湖北省1998年至2009年能源消费的碳足迹计算为例,根据计算过程和结果对比这几种模型,分析这几种模型的各自优点和缺陷,试图指出合适的计算区域能源消费碳足迹计算模型。

## 1 能源碳足迹计算模型

### 1.1 碳汇法模型

传统模型用吸收能源燃烧排放二氧化碳所需林地面积来表征能源足迹,目前很多研究都基于碳汇法计算区域能源足迹或人均能源足迹<sup>[9, 15-16]</sup>,其计算公式为:

$$EEF = \sum_i^n \frac{Q_i \times 7000 \times 4.1868}{P_i \times 10^6} \quad (1)$$

EEF为能源足迹总量, $i$ 表示能源消费类型。 $Q_i$ 为某类能源的标准煤消费量,由能源消费的原始统计数据乘以表1的折算系数求得; $P_i$ 为能源的全球平均足迹,简称为能源因子,如表1。1 kg标准煤的燃烧热值约等于7000 kcal,1 kcal约等于4.1868 kJ。

表1 碳汇法能源足迹计算参数

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
折算系数(以kg标准煤计)	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.33
能源因子 ( $10^3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	55	55	93	93	93	93	93	71

### 1.2 基于净初级生产力的改进模型

生物生产力是指从个体、群体到生态系统、区域乃至生物圈等不同生命层次物质生产能力,它决定着系统的物质循环和能量流动。单位时间和单位面积上,绿色植物通过光合作用所产生的全部有机物同化量,即光合总量,叫做总初级生产力(GPP)。净初级生产力(NPP)则是从光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分<sup>[17]</sup>。它直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力,可准确直观地反映各种土地类型的生产力差别<sup>[18]</sup>。用生态系统净初级生产力代替或表征土地的碳吸收能力已有先例<sup>[19]</sup>,利用净初级生产力来改进能源足迹的传统计算方法成为可能。

(1) 计算区域净初级生产力

$$NPP_{\text{reg}} = \sum_{j=1}^m \frac{A_j \times NPP_j}{A} \quad (2)$$

$NPP_{\text{reg}}$ 为区域净初级生产力; $j$ 为土地利用类型; $NPP_j$ 为 $j$ 类土地的净初级生产力; $A_j$ 为 $j$ 类土地面积; $A$ 为区域土地总面积。根据收集到的已有数据,选定耕地、园地、林地、草地四种土地类型。耕地、园地、林地、草地四种土地类型的净初级生产力为正值,即这几种类型土地负载的植物净有机质生产量为正。综合相关参考相关文献,给定如下的计算参数<sup>[19]</sup>,如表2。

表2 各土地类型的年净初级生产力

土地类型	耕地	园地	林地	草地
年净初级生产( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	4.243 0	5.415 0	6.583 0	4.835 0

(2) 计算能源消费碳排放量

$$C = \sum_i^n E_i \times f_i \times c_i \quad (3)$$

$C$ 为碳排放总量; $i$ 为主要能源消费种类; $E_i$ 为能源消费量原始数据; $f_i$ 为能源标准煤折算系数; $c_i$ 为能源的碳排放系数。折算系数和排放系数的取值参照相关研究成果<sup>[20, 21]</sup>,如表3。

表3 各种能源的碳排放系数

排放系数	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
( $10^4 \text{ t} \cdot \text{J}^{-1}$ )	0.755 9	0.855	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.448 3

(3) 计算能源足迹

$$EEF = \frac{C}{NPP_{\text{reg}}} \quad (4)$$

EEF为能源足迹总量,用每年的足迹总量和人口数据可以得到每个年份的人均能源足迹。

### 1.3 基于净生态系统生产力的改进模型

净生态系统生产力(NEP)的概念在研究陆地生物圈到底是大气二氧化碳之源还是汇的问题时被提出。净生态系统生产力是指净初级生产力中减去异氧呼吸消耗光合产物之后的部分。NEP表示较大尺度上碳的净储存,其数值可以是正也可以是负。已有研究证明净生态系统生产力在长时间序列上会随着平均温度、平均降水量,空气中二氧化碳的浓度变化而变化。

对比NPP和NEP,二者的概念区别是植被凋落物的有机质损失部分是否被包含。从较长的时间尺度看,植物的凋落物在进入地表或成为土壤有机质的一部分后又通过土壤呼吸而释放到大气中<sup>[22]</sup>。有研究基于陆地碳循环的过程,认为在短时期内对陆地碳循环有较大作用的是净生态系统生产力,用

NEP 来分析化石能源的碳循环更加妥当<sup>[23]</sup>。其计算公式可理解为碳排放总量和单位排放足迹的乘积，其计算公式为：

$$EEF = C \times \left( \frac{P_a}{NEP_a} + \frac{P_f}{NEP_f} + \frac{P_g}{NEP_g} \right) \quad (5)$$

EEF 和 C 代表的含义同上改进方法，上式括号内代表 1 吨碳排放的碳足迹。P<sub>a</sub>、P<sub>f</sub>、P<sub>g</sub>分别为农田、森林、草地吸收碳的比例，可以由面积之比例计算得到。NEP<sub>a</sub>、NEP<sub>f</sub>、NEP<sub>g</sub>分别为农田、森林、草地的平均净生态系统生产力，NEP<sub>f</sub>、NEP<sub>g</sub>参考相关研究成果<sup>[23]</sup>。

能源消费的碳排放量计算同净初级生产力改进模型。大部分研究认为农田生态系统具有较强的碳吸收能力，在计算碳足迹时应考虑在内。在部分研究中，耕地被认为是碳源<sup>[24]</sup>，林地和草地生态系统则普遍被认为具有碳汇的作用。农田生态系统是否存在净吸收和吸收量的大小上都存在一定的争议，本文认为农田生态系统不应被考虑在内，用农作物的含碳量来代替农田生态系统的碳吸收能力这与我们普遍认知的固碳措施是相违背的。本文只考虑林地和草地生态系统的净吸收能力，其计算参数综合相关文献总结如表 4<sup>[23]</sup>。

表 4 各生态系统的年净生态系统生产力

Table 4 Net ecosystem productivity of different ecological system

生态系统类型	森林	草地
年净生态系统生产力/(t·hm <sup>-2</sup> )	3.809 6	0.948 3
消纳 1 t 碳的用地/hm <sup>2</sup>	0.262 5	1.054 6
吸收碳的比例	0.827 2	0.172 8

## 2 研究区概况

湖北省地处我国中部腹地，长江中游，北接河南省，东连安徽省，东南和南邻江西、湖南两省，西靠重庆市，西北与陕西省为邻。介于北纬 29°05′—33°20′，东经 108°21′—116°07′，东西长约 740 km，南北宽约 470 km，地跨我国地势第二阶梯和第三阶梯过渡地带，地势大致为东、西、北 3 面环山，中间低平，略呈向南敞开的不完整盆地。省内地貌由中南部向周围山地逐渐上升，呈马蹄形层次分布的特点。面积 18.59×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>，占全国总面积的 1.94%。属亚热带季风性湿润气候，具有从亚热带向暖温带过渡的特征，光照充足、热量丰富、降水充沛、雨热同季。年均日照时数为 1 200~2 200 h，无霜期在 230~300 d 之间，年均降水量为 800~1 600 mm。年均温 15~17 ℃，7 月均温为 27~29 ℃，江汉平原最高温度在 40 ℃以上，为中国酷热地区之一。由于受地形影响，大神农架南部等地为全省多雨中心，

江汉平原在梅雨期长的年份常发生洪涝灾害。

## 3 数据来源与处理

化石能源、电能、生物质能、太阳能、水能、风能和核能是目前主要的消费能源，而其中化石能源代表的传统能源仍是公认的碳排放来源。鉴于数据的可取得性，本文仅计算主要的化石能源等传统高碳能源的碳排放，选取了原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气这八种主要的化石能源。研究主要采用 1998—2009 年湖北省的各种主要能源消费量、土地利用等数据。其中能源消费量数据来自《中国能源统计年鉴》，土地利用数据来自《湖北省国土资源管理基础数据手册》，人口、GDP 等其他相关数据来自《湖北统计年鉴》和湖北省相关官方统计资料。

## 4 实证分析

以湖北省 1998—2009 年能源消费为例，计算了碳排放量，并用上述 3 种方法模型分别计算了能源消费的碳足迹总量，人均碳足迹。

### 4.1 碳汇法计算

能源消费的标准量由各种能源的表观消费量乘以各自的标准煤折算系数得到。根据碳汇法计算能源消费碳足迹的公式，代入每种能源消费标准量和能源因子，累加各种能源的碳足迹求得历年的碳足迹总量，结果如表 5。

表 5 碳汇法计算的湖北省历年碳足迹

Table 5 Annual carbon footprint of Hubei calculated

by carbon sink method						10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup>
年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003
总量	3 008.2	3 090.7	3 152.8	3 091.3	3 301.4	3 685.9
年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009
总量	4 062.2	4 491.7	5 093.2	5 605.4	5 484.1	5 897.0

### 4.2 净初级生产力改进模型计算

#### 4.2.1 土地利用结构和区域 NPP

区域年净初级生产力(NPP)的计算考虑了耕地、园地、林地、草地 4 种土地利用类型，这 4 种土地利用类型被很多研究认为起到了碳汇作用。运用这 4 种类型平均净初级生产力和湖北省历年土地利用数据，计算得到各年湖北区域年净初级生产力。计算结果如表 6，为体现年际差异计算时保留了 4 位小数。

表 6 区域净初级生产力

Table 6 Regional net primary productivity t·hm<sup>-2</sup>

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003
NPP	5.655 8	5.657 0	5.658 2	5.661 3	5.675 3	5.695 1
年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009
NPP	5.699 3	5.702 9	5.704 2	5.704 3	5.704 1	5.666 1

4.2.2 碳排放量

根据《中国能源统计年鉴》分地区能源消费统计的煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气等八种能源消费量,依据各种能源的标准煤折算系数和相关研究通常采用的碳排放系数计算得到1998—2009年湖北能源消费的碳排放量,如表7。

表7 1998—2009年湖北省能源消费碳排放量  
Table 7 Carbon emissions from energy consumption of Hubei province in 1998-2009

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003
排放量	4 525.8	4 664.8	4 768.0	4 648.4	4 969.6	5 554.9
年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009
排放量	6 115.8	6 773.9	7 656.5	8 445.2	8 273.9	8 895.8

可见,能源消费碳排放量由1998年的 $4\,525.81 \times 10^4$  t增长到2009年的 $8\,895.81 \times 10^4$  t,增长接近两倍,年均增长率6.34%。1998—2002年增长速度较慢,2003年以后增长速度较快。由此可以预见,能源消费的碳足迹整体趋势也是逐年上升的。

4.2.3 改进足迹总量

用上文计算得到的历年碳排放量和历年区域平均净初级生产力,通过公式计算得到历年的碳足迹总量,如表8。

表8 基于净初级生产力方法计算的湖北省历年碳足迹  
Table 8 Annual carbon footprint of Hubei calculated by NNP method

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003
总量	800.2	824.6	842.6	821.1	875.6	975.3
年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009
总量	1 073.1	1 187.8	1 342.2	1 480.5	1 450.5	1 570.0

4.3 净生态系统生产力改进模型计算

首先计算单位碳排放量的足迹。根据林地和草地生态系统的平均净生态系统生产力和碳吸收比例,计算得到吸收1 t碳的足迹为 $0.4127 \text{ hm}^2$ 。根据上面计算得到的历年碳排放量计算得到历年的碳足迹总量,如表9。

表9 基于净生态系统生产力方法计算的湖北省历年碳足迹  
Table 9 Annual carbon footprint of Hubei calculated by NEP method

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003
总量	1 867.80	1 925.16	1 967.79	1 918.43	2 050.98	2 292.52
年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009
总量	2 524.01	2 795.62	3 159.87	3 485.34	3 414.67	3 671.30

4.4 结果分析和模型比较

运用历年湖北省人口数据,可以分别计算出3种模型下的人均湖北省能源消费碳足迹。分别对比

其碳足迹总量和人均碳足迹,其结果如图1、图2。3种模型的计算结果在趋势走向上大致相同,碳足迹总量和人均量均呈快速增长状态。在计算结果的大小上,依据碳汇法计算得到的碳足迹总量和人均碳足迹均显著高于两种基于生产力的改进模型。净生态系统生产力模型的计算结果次之,净初级生产力改进模型的计算结果最低。

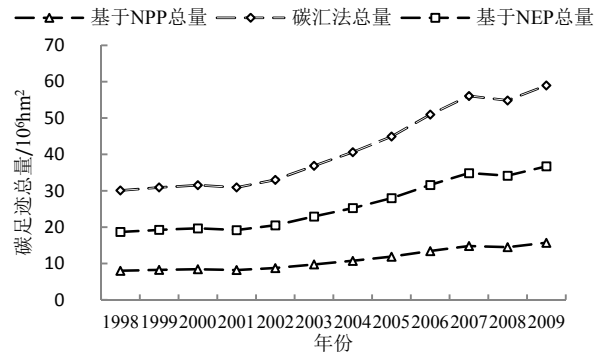


图1 3种模型的总量足迹  
Fig.1 Total footprint of three models

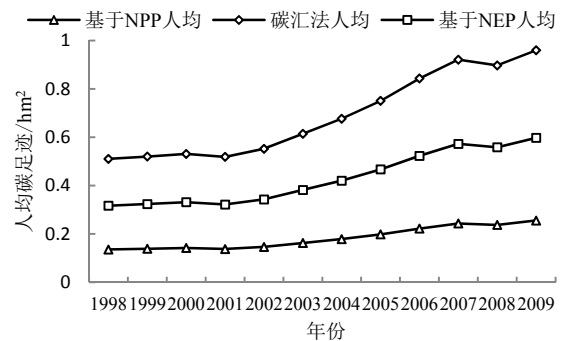


图2 3种模型的人均足迹  
Fig.2 Per capita footprint of three models

以上3种模型是目前相关研究和学者通常采用的计算能源消费碳足迹的模型。碳汇法也可以理解为是传统的能源足迹计算模型,诞生于生态足迹计算模型中的一部分,它往往单纯的以林地吸收为表征,忽略了其他生物生产性土地的碳吸收功能和能力。已有的很多研究证明土地利用变化会引起区域碳吸收能力的改变,进而对能源碳足迹的大小产生影响。显然在参数选取时,用整个区域的综合碳吸收能力取代单纯林地的碳吸收能力更加恰当。碳吸收能力是一个相对宽泛的概念,可由总初级生产力、净初级生产力、净生态系统生产力等多种生产力指标来表征。正是在此理解的基础之上,运用净初级生产力和净生态系统生产力改进计算能源消费碳足迹的模型应运而生。净初级生产力改进模型增加考虑了除林地外,耕地、园地、草地等其他土地类型的碳吸收能力,考虑了植物自养呼吸碳释放而抵消损失的吸收能力。但是从生态系统的角度考虑,

植物的一部分凋落物在凋落到地表或者进入土壤后的异氧呼吸同样释放了一部分碳, 从而生态系统实际的碳吸收能力又降低了。净生态系统生产力则同时考虑以上两个方面。

在不同土地类型碳吸收能力的问题上, 耕地和园地的碳吸收能力也是值得深入研究的问题。在净初级生产力改进模型中, 耕地和园地的碳吸收能力往往通过地上物也就是农作物的果实和秸秆的碳吸收来体现。然而农作物的果实和秸秆通过人的消费和秸秆焚烧, 最后又将其所汇聚的这部分碳释放在空气中。再者, 如果把农作物这种碳吸收能力等同于耕地和园地的碳吸收能力, 则很容易导致得出为了增加碳吸收, 无限制进行复种和土地翻耕的谬论。因为复种指数越高、农作物产量越大, 农作物固碳量自然越大, 耕地和园地的碳吸收能力越强。这显然与普遍提倡的休耕、免耕等土壤环境和固碳政策措施等相违背。

碳汇法采用的能源因子由林地的全球平均碳吸收系数  $1.420 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  和对应能源的碳排放系数得来, 这个指数相对于许多研究结果明显偏低<sup>[25]</sup>, 所以得出的计算结果最大。净初级生产力未考虑生态系统异氧呼吸碳的损失量, 过高估计了区域的实际碳吸收能力, 所以得出的计算结果最小。净生态系统生产力从生态系统角度出发, 在总初级生产力的基础上扣除了植物自养呼吸释放量, 凋落物和土壤的异氧呼吸释放量, 代表了生态系统实际的碳吸收能力。综上所述认为, 由净生态系统生产力改进模型计算的能源消费碳足迹较为合理。

同时根据 3 种模型的计算过程, 3 种模型计算过程中均引用了固定的统计值或平均值来代替区域的实际值, 存在一定的不合理性, 计算得到的并不是一个区域实际的能源碳足迹。已有研究表明, 土壤呼吸是陆地生态系统 NEP 的决定因素, 由于全球温度和二氧化碳浓度的上升, NEP 也有增加的趋势。所以每个生态系统的净生态系统生产力并不是一个固定不变的值, 这也是值得我们深入研究的问题。同时在模型的普适性方面, 这些模型的缺点是仅仅适用于研究封闭的孤岛系统的碳足迹, 是从能源的表观消费量计算研究区域的直接碳足迹, 无法计算隐含碳排放<sup>[8]</sup>。

## 5 结论

总结了常用的计算能源消费碳足迹的几种模型, 分别介绍了其计算公式、改进思路和计算过程, 并列出了常用的计算参数。在此基础上, 运用湖北省 1998—2009 年能源消费数据和土地利用数据分别计算了能源消费的碳足迹。分析比较了计算的过程和结果, 得到的结论如下:

(1) 目前常用的计算能源消费碳足迹的模型有碳汇法模型、净初级生产力改进模型和净生态系统生产力改进模型。3 种模型的计算结果在时间序列上整体走势大致相同, 在数量上碳汇法模型最大, 净生态系统生产力改进模型次之, 净初级生产力改进模型最小, 且碳汇法模型的计算结果明显大于改进的两种模型。

(2) 计算结果差异的原因在于, 碳汇法模型只考虑林地的碳吸收能力, 忽略了区域其他用地类型的碳吸收能力。净初级生产力改进模型考虑了各种用地类型的吸收能力, 但忽略了异氧呼吸的碳释放, 高估了区域的碳吸收能力。

(3) 净生态系统生产力反映了各个生态系统的实际碳吸收能力。净生态系统生产力改进模型考虑了实际具有碳吸收能力的生态系统类型, 反映了区域实际的碳吸收能力。本文认为该改进模型比之其他两种模型更加合理。

不足之处, 几种模型都运用了固定值或者平均统计量, 未能考虑地域差异, 同时未考虑各统计量随时间和气候等变化而变化的可能, 存在一定的不合理性, 这是今后研究值得深入研究的问题和方向。

## 参考文献:

- [1] HAMMOND G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue[J]. NATURE, 2007, 445(7125): 256.
- [2] WIEDMANN T, MINX J. A definition of 'carbon footprint'[J]. ISA UK Research Report, 2007, 7(01):.
- [3] FINKBEINER M. Carbon footprinting—opportunities and threats[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(2): 91.
- [4] 祁悦, 谢高地, 盖力强, 等. 基于表观消费量法的中国碳足迹估算[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2053-2058.
- [5] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1639-1649.
- [6] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. 地理学报, 2010, 65(9): 1048-1057.
- [7] 刘竹, 耿涌, 薛冰, 等. 中国低碳试点省份经济增长与碳排放关系研究[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 620-625.
- [8] 耿涌, 董会娟, 郗凤明, 等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010(10): 6-12.
- [9] 陈成忠, 林振山. 中国能源足迹增长波动的驱动因子分析[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 758-767.
- [10] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 69-78.
- [11] 方恺, 沈万斌, 董德明. 能源足迹核算的改进与预测: 以吉林省为例[J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1835-1846.
- [12] KITZES J, GALLI A, BAGLIANI M, et al. A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts[J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1991-2007.
- [13] 方恺, 董德明, 沈万斌. 能源足迹改进方法及其在区域能源利用效益分析评价中的应用[J]. 地理科学, 2010, 05: 686-691.

- [14] 方恺, 沈万斌, 王黎黎. 基于能源足迹改进模型的农业区可持续性分析[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 66-69.
- [15] 赵冠伟, 杨木壮, 陈健飞. 1990-2007年中国能源足迹时空差异分析[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2): 65-69.
- [16] 杨继松, 胡晓钧, 吴昊. 辽宁省能源足迹变动的分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2216-2219.
- [17] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [18] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597.
- [19] VENETOULIS J, TALBERTH J. Refining the ecological footprint[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441-469.
- [20] 史安娜, 李森. 基于LMDI的南京市工业经济能源消费碳排放实证分析[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1890-1896.
- [21] 蒋金荷. 中国碳排放量测算及影响因素分析[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 597-604.
- [22] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
- [23] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1729-1735.
- [24] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008: 102-107.
- [25] 方恺, 董德明, 沈万斌. 基于净初级生产力的能源足迹模型及其与传统模型的比较分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2042-2047.

## Comparative study on regional carbon footprint of energy consumption calculation models: A case study of Hubei province

DENG Xuankai<sup>1</sup>, LIU Yanfang<sup>1, 2\*</sup>, LI Jiwei<sup>1</sup>

1. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Energy consumption is the main source of carbon emissions. Research on carbon footprint of energy consumption has important theoretical and practical significance. How to accurately calculate or express carbon footprint of energy consumption has become an important question of this research field. Based on a related literatures review, this paper summarizes the main calculation models which are widely applied for calculating carbon footprint of energy consumption at present. They are carbon sink model, net primary productivity modified model and net ecosystem productivity modified model. Formulas, parameters and calculation process of above three models are introduced respectively. Take Hubei province as an example, calculated total and per capita carbon footprint of energy consumption from 1998 to 2009 using these three models. The main results are: The study area carbon emissions of energy consumption is growing rapidly, total or per carbon footprint of three models calculation have the consistent trend basically from time series, all present rapid growth. But three models' results are great difference in quantitative terms. Carbon sink model's result is the biggest, net ecosystem productivity modified model is the second and net primary productivity modified model results is minimum of them. And carbon sink model's result significantly bigger than the other two models'. The reasons for the results' differences are because that the carbon sink model only considers the forest absorption ability ignore other land use types in study area. Net primary productivity modified model considers various land types which are capable of carbon absorption, but ignores the carbon emissions from heterotrophic respiration of ecological system, overestimates regional carbon absorption ability. In the study, we can see that three models have all used fixed value or average statistics, failed to take account of regional differences. At the same time, there is a little bit of irrationality that models do not considering the possibility of fixed value or average statistics' change follow time and climate change. These questions are worth further study in the future.

**Key words:** energy; carbon footprint; net primary productivity; net ecosystem productivity