

基于投入产出分析的中国生态足迹模型

曹淑艳 ,谢高地

(中国科学院地理科学与资源研究所 ,北京 100101)

摘要 基于投入产出分析技术的生态足迹 (EF)核算模型是目前国际生态承载力研究的热点模型之一。在已有研究的基础上,引入土地利用差异转化系数(某类土地利用的产量因子与其均衡因子的乘积)改进模型,以保证投入产出表的行、列组分加和操作的有效性。研究以货币型投入产出表为基础核算中国 1997 年的 EF,分析表明:(1)1997 年中国为 EF 净出口国,人均 EF 贸易逆差 0.050 hm^2 ,占生产包含足迹的 3.4%;(2)最终使用的人均 EF 为 1.435 hm^2 (能源足迹占 45.1%)其中 2/3 缘于居民消费,另 1/3 缘于资本形成;(3)第一、二、三产业包含的人均 EF 依次为 0.499 、 0.721 hm^2 和 0.183 hm^2 。其中,第一产业以直接占用生态空间为主,而第二、三产业以间接占用为主,如第二产业的隐性非能源足迹是其直接值的 140 余倍;(4)三大产业部门中,第三产业最终产品消费的 EF 最小,人均 0.183 hm^2 ,而其土地利用的经济效率最高,为 0.898 万元 hm^{-2} 。实践表明基于投入产出分析的 EF 模型不仅承袭了 EF 基本模型的优点,而且结构性能好,能同时识别社会各生产和消费部门的生态压力及其在不同部门之间的流转情况,并可有效避免足迹组分的重复计算。

关键词 生态足迹组分;生态足迹贸易逆差;生态影响;投入产出分析

文章编号:1000-0933(2007)04-1499-09 中图分类号:Q149 文献标识码:A

Applying input-output analysis for calculation of ecological footprint of China

CAO Shu-Yan, XIE Gao-Di

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 1499 ~ 1507.

Abstract : Over the past years, some studies have tried to combine ecological footprint (EF) accounting and input-output analysis (IOA) for the calculation of total land appropriation of production and consumption activities. The results derived from EF are able to visualize hidden ecological cost of an activity or population. Although this EF model has its own peculiarities and insights, it has roots in the work of Wackernagel and Rees. The EF model based on IOA has been firstly advanced by Bicknell *et al*, adjusted and modified by Ferng, and practiced by Hubacek *et al*, McDonald *et al* and Lai L *et al*. These researches express EF in Local Hectare. To compare EF results obtained from various analyses based on original EF model, this paper expresses EF in Global Hectare. Therefore, a modification has been made to the existing IOA based on EF model framework by introducing diversity conversion factors which is defined as the multiplier of a land use's yield factor and its equivalent factor. This modification can make useful additive calculations along both the column and row in the input-output table. This calculation employs China monetary input-output table in 1997 as the base table. The results indicate the followings: (1) the Chinese EF embodied in domestic production sectors is 1.485 hectares per capital (hm^2)

基金项目:中国科学院创新团队国际合作伙伴计划资助项目(CXTD-Z2005-1),国家自然科学基金资助项目(30570303)

收稿日期:2006-03-28;修订日期:2006-11-28

作者简介:曹淑艳(1976~),女,辽宁省昌图县人,博士生,主要从事环境评价与资源承载力研究。E-mail:caosy.04b@igsrr.ac.cn

Foundation item :The project was financially supported by Chinese Academy of Sciences International Partnership Project (No. CXTD-Z2005-1) and National Natural Science Foundation of China (No. 30570303 and No. 30370258)

Received date 2006-03-28 ; **Accepted date** 2006-11-28

Biography :CAO Shu-Yan, Ph. D. candidate, mainly engaged in environmental assessment and resource carrying capacity. E-mail:caosy.04b@igsrr.ac.cn

cap⁻¹), of which 1.435 hm² cap⁻¹ was appropriated by domestic final consumption and 0.050 hm² cap⁻¹ by net export thanks to the fact that China was situated in net EF trade deficit in international market in 1997; (2) two thirds of the 1.435 hm² cap⁻¹ appropriated by Chinese final use is attributed to household consumption and one thirds to capital formation; (3) the EF of the primary, secondary and tertiary sector varies from 0.499, 0.721 and 0.183 hm² per capital, respectively, and these sectors' indirect land footprint is 1.24, 143.11 and 16.11 times of their direct ones respectively, indicating the primary sector's ecological pressure is mainly from direct land use, and the other two sectors' from hidden appropriation. Among the three production sectors, the per capital EF embodied in the production of the tertiary sector ranks the lowest with a value of 0.183 hm², but the per hectare footprint output is the highest with a figure of 8980 RMB. Therefore, further enhancing its position in and contribution to Chinese economic sectors will weaken ecological impacts imposed by social metabolism. The analysis shows that IOA based EF model has a good structure, can identify where the EF actually takes place and how EF component flows among production and consumption sectors, and avoid from double accounting. It should be noted that the new EF model is still facing incomplete accounting of pollutants emissions, and inevitably has methodological shortcomings observed in general input-output analysis.

Key Words : footprint component ; ecological footprint trade deficit ; ecological impact ; input output analysis

生态足迹 (EF) 通过评价满足某一消费格局所需的生态生产性土地和水域的面积来衡量人类的自然资本需求, 同时它把人类对自然资本的需求与自然界的可更新能力进行对比, 以此揭示区域自然资本的供需关系。EF 模型具有的表达直观、方法综合、操作性强等优点, 促进了这一方法在生态承载力研究领域的迅速传播和广泛应用^[1,2]。目前有两类 EF 模型应用频率最高, 一类是 Wackernagel 与 Rees 提出的基本模型^[3], 另一类是基于投入产出分析的模型 (简称 IOA-EF 模型)。IOA-EF 模型最早由 Bicknell^[4]提出, 他们利用投入产出表的产品流信息追踪和计算最终消费的 EF 格局, 为衡量社会经济代谢的生态影响迈出了重要的一步。之后, 很多研究者对 Bicknell 提出的 IOA-EF 模型进行了有益的改进与实践^[5-10]。由于投入产出表能清晰地描述社会最终需求部门和生产部门的联系结构和数量关系^[11], 使得 IOA-EF 模型具有良好的结构性, 一定程度弥补了 EF 基本模型在识别环境影响的真实发生位置、组分构成及其在产业间的相互联系等不足^[3-5]。本文利用中国 1997 年投入产出表, 在已有研究基础上改进 IOA-EF 模型, 并用之核算和识别中国社会经济代谢的环境影响及其组成格局。

1 研究方法

1.1 主要参数及定义^[4]

IOA-EF 模型涉及的关键参数:

(1) 直接消耗系数 指第 j 部门生产单位产值产品所直接消耗第 i 部门产品的数量。

(2) 完全需求系数 指第 j 部门生产单位最终产品对于第 i 部门产品的完全需求数量, 包括直接需求和间接需求。

(3) 土地 (能源或能源足迹) 投入系数 指第 j 部门生产单位产值产品所直接使用或需要的土地 (能源或能源足迹)。

(4) 土地 (能源或能源足迹) 完全需求系数 第 j 部门生产单位最终产品的完全土地 (能源或能源足迹) 的需求量。

(5) 土地 (能源或能源足迹) 乘数 指单位最终产品的土地 (能源或能源足迹) 的完全需求量与其直接投入量的比值。

1.2 投入产出表的选择与数据来源

依据计量单位, 静态投入产出表包括实物型和价值型两种。两种投入产出表在应用中存在显著差异, 且各有千秋^[12], 选择哪一种要视研究的具体情况而定。中国是应用投入产出分析比较晚的国家, 1974 ~ 1976

年试编了第一张全国投入产出表,1987 年开始将投入产出表编制工作制度化,每 5a (逢 2、逢 7 年份)调查和编制一次全国投入产出基本表,基本表编制年份以后 3a (逢 5、逢 0 年份)编制延长表。截止目前,中国编制了 1987、1992、1997 年 3 张基本表,1990、1995 和 2000 年 3 张延长表。因土地利用数据的限制,本研究选用中国国家统计局国民经济核算司编制的 1997 年度中国投入产出表^[13]。这是一张货币型表。产量和土地利用数据依据联合国粮农组织 (FAO) 统计数据库^①和中国统计年鉴 (1999 年)^[14]获取,各部门能源消费数据参考中国能源统计年鉴 (1997 ~ 1999 年)^[15]。

1.3 研究步骤与方法

IOA-EF 模型是一种应用投入产出分析技术核算 EF 的方法。Bicknell 等^[4]率先提出该方法后,Ferng 对之进行了完善、修正^[7]和扩展应用^[8],Lenzen^[5]、McDonald^[6]、Hubacek^[9]等分别运用投入产出技术进行区域 EF 核算实践。这些研究^[4-9]核算的生态足迹均为区域真实的生产空间面积。这里拟采用全球平均生产力空间表征,以便于与由 EF 基本模型得到的研究结果进行对比。为此,研究引入土地利用差异转化系数,并将之定义为某类土地利用的产量因子与其均衡因子的乘积,产量因子与均衡因子 (又译“当量因子”)解释详见谢高地等研究^[21]。这种处理保证了投入产出矩阵的行、列组分加和操作的有效性。其中,均衡因子参考 Wackernagel 研究^[16],产量因子依据联合国 FAO 数据库和中国统计年鉴 (1999) 数据计算。分析步骤和方法主要基于文献 6 ~ 8 演化而来。

第一步,计算完全需求系数矩阵。等于单位矩阵与直接消耗系数矩阵的差值矩阵的逆,即 $[I - A]^{-1}$,完全需求系数矩阵又称里昂别夫 (Leontif) 逆矩阵:

$$A_{n \times n} = U_{n \times n} \cdot [X_{n \times n}]^{-1} \quad (1)$$

式中, A 为直接消耗系数矩阵; U 为部门中间投入矩阵; X 为部门总产出的对角矩阵; n 为产业部门的类型数。由于缺乏详细的部门土地利用数据,这里仅将生产部门分解为第一、二、三产业,即 $n = 3$ 。

第二步,计算最终使用包含的非能源用地的土地需求 (非能源足迹)。

(1) 分别依据式 2、3 计算各生产部门基于中国实际生物生产力衡量的面积 (hm^2) 的土地投入系数矩阵和完全土地需求系数矩阵;

(2) 用式 2、3 的结果矩阵左乘土地利用差异转化系数矩阵,使土地系数矩阵以全球生物生产力衡量的面积 (hm^2) 为单位表达。以完全土地需求系数为例说明 (式 4);

(3) 用上一步骤的结果矩阵分别右乘部门最终使用的对角矩阵及其组分矩阵,以计算生产和消费所需的非能源足迹,见式 5、6:

$$i_{k \times n} = L_{k \times n} \cdot [X_{n \times n}]^{-1} \quad (2)$$

$$r_{k \times n} = i_{k \times n} \cdot [I - A]_{n \times n}^{-1} \quad (3)$$

$$R_{k \times n} = c_{k \times k} \cdot r_{k \times n} \quad (4)$$

$$FP_{k \times n} = R_{k \times n} \cdot Y_{n \times n} \quad (5)$$

$$FPU_{k \times m} = R_{k \times n} \cdot [FTU]_{n \times m} \quad (6)$$

式中, i 和 L 分别为用中国实际生产力表达的部门土地投入系数矩阵和土地投入矩阵; r 和 R 分别为用中国实际生产力和全球平均生产力表达的土地完全需求系数矩阵; c 为土地利用差异转化系数的对角矩阵; FP 和 FPU 顺次为生产部门和最终使用部门的非能源足迹矩阵; Y 为最终使用的对角矩阵; 下标 k 与 m 分别表示土地利用和消费部门的类型数。其中,消费部门包括居民最终消费、政府最终消费、资本形成 (固定投资与存货增加) 与出口,即 $m = 4$,土地利用包括耕地、林地、牧草地、水域、建设用地 (第二产业用)、建设用地 (第三产业用),即 $k = 6$ 。

第三步,计算能源消费的生态足迹 (即能源足迹)。为避免重复计算,本研究首先利用能源转化系数将各

① 网址 <http://faostat.fao.org/faostat/collections?subset=agriculture>

类能源消耗量转化为相应的一次能源 (式 7)^[8] ,然后再以 Wackernagel 研究^[17]提供的比能源足迹 (单位面积森林吸收 CO₂的能力)为转化基准,依据式 8 求解各部门的能源足迹系数矩阵。最后参考式 5、6 计算生产部门和最终使用部门的能源足迹。在分析过程中,将生活用能源消费作为尾列加入到各矩阵之中,形成相应的扩展矩阵:

$$[rR]_{5 \times (n+1)} = T_{5 \times 8} \cdot [r^n]_{8 \times (n+1)} \tag{7}$$

$$[rRF^n]_{5 \times (n+1)} = El_{5 \times 5} \cdot ([f_{5 \times 5}]^{-1} \cdot [rR]_{5 \times (n+1)}) \tag{8}$$

式中, rR 为一次能源完全需求系数扩展矩阵; T 为能源转化系数矩阵,其中能源转换系数依据 1997 年中国一次能源与各类能源的转换效率计算; r^n 和 rRF^n 分别为能源和能源足迹的完全需求系数扩展矩阵; El 为土地利用均衡因子的对角矩阵; f 为比能源足迹的对角矩阵; 下标数字“5”和“8”分别表示一次能源和各类能源的种类数^①。

第四步,计算进口贸易 (包括其他来源产品)包含的生态空间需求。由于难以完全获取进口产品提供国的投入产出表、土地利用与生产力、能源投入格局与效率等核算数据,这里假设:(1)进口产品提供国的平均生产技术水平、一次能源完全需求系数及结构与中国类似;(2)进口产品均为最终制成品,且只用于最终消费使用;(3)进口产品提供国基于全球平均生物生产力表达的土地投入系数的平均水平与中国的实际土地投入系数近似。以上述假设为基础,进口贸易包含的非能源足迹依式 9 计算,能源足迹参考式 6 估算:

$$FIP_{k \times n} = R'_{k \times n} \cdot [Y_i]_{n \times n} = [E_{k \times k} \cdot r_{k \times n}] \cdot [Y_i]_{n \times n} \tag{9}$$

式中, FIP 为进口贸易包含的非能源足迹矩阵; R' 为进口产品的土地完全需求系数矩阵; Y_i 为进口产品最终使用的对角矩阵; E 为土地利用均衡因子的对角矩阵; r 同式 3。

第五步,分别按生产部门和最终使用部门汇总中国及其生产和消费部门的 EF 组分。

2 计算结果与分析

2.1 社会生产与消费的生态足迹

表 1 是 1997 年中国及其各部门的生态空间需求信息。由于城镇与农村居住用地无法嵌入到投入产出表中,研究结果未包含这部分人均生态空间 (0.05 hm²)。表 1 显示 1997 年中国生产部门包含的人均 EF 为 1.485 hm²,最终消费部门占用的人均 EF 为 1.435 hm²。该年中国贸易行为无论在产品原料投入、能源利用以及两者综合方面,均属于 EF 净出口国。其中,出口携带足迹人均 0.262 hm²,进口携带足迹人均 0.212 hm²,EF 贸易逆差为人均 0.050 hm² (其中 62% 缘于非能源足迹),占中国最终产品包含足迹的 3.4%。

中国生产与消费的足迹构成基本相同,图 1 以生产部门为例描述中国 1997 年的 EF 结构。图 1 表明,能源用地、耕地和水域足迹是中国生态空间的主要需求类型,三者分别占总 EF 的 45.1%、22.3% 和 19.6%,合计 87.0%。中国能源足迹 (表 1)具有如下特征:能源种类上,81.7% 的能源足迹需求来自煤炭燃烧;产业部门上,81.1% 的能源足迹来自第二、三产业,两部门的人均足迹分别为 0.430 和 0.111 hm²;最终消费部门上,79.8% 的能源足迹来自居民消费 (人均 0.332 hm²) 和资

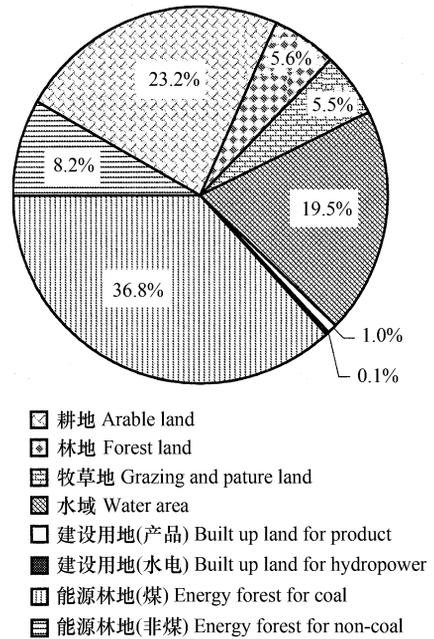


图 1 1997 年中国生态足迹构成

Fig. 1 Structure of China ecological footprint

① 各类能源包括原煤、原油、天然气、核电、水电、火电、石油产品、其他煤炭产品等 8 类;一次能源包括原煤、原油、天然气、核电、水电等 5 类

本形成(人均 0.207 hm^2)。能源用地属于虚拟土地,在生态空间供给端并不真实存在,但从可持续能源情景考虑却属于需求端的真实需求。当非能源生产性空间盈余量与未参与计算的森林空间之和不足以抵消这部分足迹需求时,研究区的生态空间将供不足需,处于生态赤字状态。中国 1997 年即属于这一情况。1997 年中国人均非能源类生产性空间盈余量为 0.031 hm^2 ,未纳入投入产出核算的人均森林面积为 0.046 hm^2 ,两者合计 0.077 hm^2 ,而人均能源足迹 0.667 hm^2 ,生态赤字幅度为人均 0.590 hm^2 。这与刘宇辉^[8]的研究结果(人均生态赤字 0.578 hm^2)十分接近。

2.2 各生产和消费部门的生态足迹

表 1 中 S_1 至 S_3 列是中国生产部门投入、产出包含的足迹空间。依图 1 所示的土地利用类型汇总表 1 的 S_1 至 S_3 列数据,结果表明 1997 年中国三大产业部门为满足社会最终使用而投入的完全生态空间(人均值)依次为 0.499 、 0.721 和 0.183 hm^2 ,合计 1.403 hm^2 ,且各部门投入的 EF 格局有所不同。第一产业以耕地和水域为主要生态空间投入类型,两者分别占部门总生态空间投入需求的 39.4% 和 34.6% ,合计 75.0% ,牧草地、林地及能源林地所占比例均在 8.5% 左右。第二、三产业的生态空间投入结构较为类似,它们的能源林地、耕地、水域的百分构成比分别为 $59.5\%:16.9\%:14.9\%$ 和 $60.8\%:15.2\%:13.4\%$,三类足迹组合合计占总 EF 投入需求的 90% 左右。

表 1 中国人均生态足迹结构(1997 年)

Table 1 Structure of Chinese ecological footprint by sectors and by final utilities

足迹类型 EF types	生产部门 Production Sectors			最终使用部门 Final use sectors				TP	IM	NE **	TU = TP - NE
	S1	S2	S3	FU ₁ *	FU ₂	FU ₃	FU ₄				
L ₁ (S ₁)	0.196	0.122	0.028	0.239	0.012	0.093	0.048	0.346	0.034	0.014	0.332
L ₂ (S ₁)	0.044	0.027	0.006	0.053	0.003	0.021	0.011	0.077	0.014	-0.003	0.080
L ₃ (S ₁)	0.042	0.026	0.006	0.051	0.003	0.020	0.010	0.074	0.016	-0.006	0.079
L ₄ (S ₁)	0.172	0.107	0.024	0.210	0.010	0.082	0.042	0.304	0.018	0.024	0.280
L ₅ (S ₂)	0.000	0.005	0.001	0.003	0.000	0.003	0.002	0.007	0.002	0.000	0.006
L ₆ (S ₃)	0.000	0.003	0.006	0.004	0.003	0.002	0.002	0.010	0.000	0.002	0.007
小计 Subtotal	0.455	0.291	0.072	0.559	0.031	0.221	0.115	0.818	0.084	0.031	0.787
L ₇ (原煤)	0.034	0.357	0.077	0.272	0.033	0.221	0.120	0.541	0.106	0.014	0.526
L ₇ (原油)	0.010	0.065	0.033	0.055	0.014	0.042	0.025	0.115	0.019	0.006	0.111
L ₇ (核电)	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
L ₇ (天然气)	0.000	0.006	0.001	0.004	0.001	0.004	0.002	0.009	0.000	0.002	0.005
L ₈ (水电)	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	-0.002	0.003
小计 Subtotal	0.044	0.430	0.111	0.332	0.048	0.267	0.147	0.667	0.128	0.019	0.648
合计 Total	0.499	0.721	0.183	0.892	0.079	0.488	0.262	1.485	0.212	0.050	1.435

TP/TU: 生产/消费合计 Total in production/consumption sectors; IM: 进口 Import; NE: 净贸易逆差 Net EF trade deficit; S_i ($i=1 \sim 3$) 依次为第一、二、三产业部门; S_i ($i=1 \sim 3$) is primary, secondary, tertiary industry; FU_i ($i=1 \sim 4$) 分别指居民最终消费、政府最终消费、资本形成和出口; FU_i ($i=1 \sim 4$) is household consumption, government consumption, capital formation and export respectively; L_j ($j=1 \sim 8$) 依次为耕地、林地、牧草地、水域、建设用地(第二产业用)、建设用地(第三产业用)、能源林地、建设用地(水电用); L_j ($j=1 \sim 8$) is arable land, forest land, grazing & pasture land, built up land for secondary industry, built up land for tertiary industry, energy land (forest), energy land (built up) respectively; 括号内 In bracket: 原煤 Crude coal, 原油 Crude oil, 核电 Nuclear power, 天然气 Natural gas, 水电 Hydropower; * FU_1 的能源足迹包括了生活能源消耗的足迹 ($0.0081 \text{ hm}^2 \text{ cap}^{-1}$) Domestic households (energy footprint of $0.0081 \text{ hm}^2 \text{ cap}^{-1}$ is included in FU_1); ** NE 为正表示 EF 净出口,属于 EF 贸易逆差,反之则表示 EF 净进口,属于 EF 贸易顺差; IF $NE > 0$, China is a net EF exporter, situated in EF trade deficit, and if $NE < 0$, situated in EF trade surplus

表 1 中 FU_1 至 FU_4 四列是最终使用部门的生态足迹。需要指出的是,按最终使用方向计算非能源足迹(式 6)时暗含将进口贸易产品等同国内生产的假设,由此得到的人均进口包含足迹比依据式 8 的结果高 0.023 hm^2 。这部分误差仅占中国最终消费人均 EF 的 1.6% ,所以在分析最终使用部门的 EF 格局时将之忽

略了。1997 年中国人均 EF 中有 2/3 缘于最终消费 (0.971 hm²), 另外 1/3 缘于资本形成 (0.488 hm²)。最终消费中, 居民消费占 91.9%, 人均 0.892 hm², 政府消费占 8.1%, 人均 0.079 hm²。资本形成方面, 1997 年中国固定资产投资 15254.2 亿元, 库存增加投资 3303.2 亿元, 二者占用的生态空间分别为 2.28 亿和 0.45 亿 hm², 它们的人均 EF 依次为 0.184 hm²和 0.037 hm², 前者约是后者的 5 倍。对万元最终消费的生态影响分析表明, 居民消费的生态影响最大, 其万元最终使用的完全生态空间需求为 3.08 hm², 比政府消费 (1.12 hm²万元⁻¹)、固定资产投资投入 (1.49 hm²万元⁻¹)、库存增加 (1.38 hm²万元⁻¹)的生态影响高 1 倍多。

2.3 乘数和完全生态空间需求系数

表 2 是中国 EF 的乘数和完全生态空间需求系数的信息。表 2 表明 1997 年中国三大产业部门的土地乘数 (基于全球生物生产力) 顺次为 1.24、143.11、16.11, 即第一产业最终产品的生态影响以直接占用为主, 而第二、三产业以隐藏占用为主, 这在第二产业尤为突出。第二、三产业的高土地乘数主要归因于农产品加工和直接服务消费消耗。1997 年中国各产业的能源足迹乘数 (表 2) 基本接近, 在 2.6~3.6 之间。完全生态空间需求系数是土地完全需求系数与能源足迹完全需求系数之和, 其倒数表征单位生态占用的最终产品产出量, 即生态占用的经济效率。1997 年中国第三产业生态占用的经济效率最高, 为 0.898 万元 hm⁻², 约是第一产业 (0.182 万元 hm⁻²) 的 5 倍, 第二产业 (0.495 万元 hm⁻²) 的 2 倍。由此可见, 提高第三产业在国民经济中的地位 and 作用, 有利于降低中国社会经济代谢的生态影响。

表 2 中国生产部门的完全需求系数 (1997 年)

Table 2 Total land or energy footprint requirement for Chinese production sectors

土地完全需求系数				能源足迹完全需求系数			
Total actual land requirement				Total energy land requirement			
EF 类型 EF types	S ₁	S ₂	S ₃	EF 类型 EF types	S ₁	S ₂	S ₃
L ₁ (S ₁)	2.154	0.342	0.169	L ₇ (原煤)	0.376	1.000	0.467
L ₂ (S ₁)	0.480	0.076	0.038	L ₇ (原油)	0.105	0.183	0.201
L ₃ (S ₁)	0.460	0.073	0.036	L ₇ (核电)	0.001	0.001	0.001
L ₄ (S ₁)	1.891	0.300	0.149	L ₇ (天然气)	0.004	0.018	0.007
L ₅ (S ₂)	0.004	0.015	0.005	L ₈ (水电)	0.001	0.002	0.001
L ₆ (S ₂)	0.004	0.009	0.039				
合计 1 Total 1	4.993	0.816	0.436	合计 2 Total 2	0.488	1.204	0.677
土地乘数	1.24	143.11	16.11	能源足迹乘数	3.34	2.63	3.52
Land multiplier				Energy land multiplier			

单位: hm²每 10000 RMB, 能源足迹乘数无量纲 Multiplier is no dimension

3 结论与讨论

3.1 主要结论

中国 1997 年社会经济代谢的生态空间需求具有如下主要特点:

(1) 人均生产包含 EF 为 1.697 hm², 其中 1.485 hm²来自国内生产, 0.212 hm²来自进口。人均 EF 中, 1.435 hm²用于国内最终使用, 0.262 hm²用于出口贸易。总体上, 1997 年中国属于 EF 净出口国, 人均 EF 贸易逆差 0.050 hm², 占生产包含 EF 的 3.4%。

(2) 45.7% 的 EF 即人均 0.667 hm²属于能源用地。这部分足迹存在着有趣的“80%”现象: 从能源种类看, 约 80% 来自煤炭消耗; 从生产部门看, 约 80% 缘于第二、三产业; 从最终使用看, 约 80% 缘于居民消费和资本形成。

(3) 三大产业部门的人均完全生态空间需求依次为 0.499、0.721 和 0.183 hm²。其中, 第二、三产业的足迹组分构成类似, 能源林地、耕地、水域的百分构成比约为 60% : 16% : 15%; 而三类足迹空间在第一产业构成比约为 9% : 40% : 35%。

(4)国内最终使用的 EF 有 2/3 缘于居民消费,1/3 缘于资本形成。前者的万元最终使用的生态占用比后者高 1 倍多,说明居民消费的生态经济效率低于资本形成。

(5)第一、二、三产业的土地乘数(基于全球生物生产力的结果)依次为 1.24、143.11 和 16.11,表明第一产业的非能源足迹以直接利用为主,而第二、三产业以间接占用为主。

(6)第三产业最终产品的人均 EF 最小,为 0.183 hm^2 ,而其土地利用的经济效率最高,为 0.898 万元 hm^{-2} 。提高第三产业在国民经济中的地位有利于降低社会代谢的生态压力。

3.2 与已有研究结果的比较

目前国内有三例时间序列研究(采用 EF 基本模型)核算了中国 1997 年的生态足迹^[18-20]。刘宇辉^[18]研究采用的均衡因子参考文献 16,产量因子根据联合国 FAO 统计数据逐年计算,这与本文处理均衡因子与产量因子的方法一致,该研究表明 1997 年的中国人均 EF 为 1.465 hm^2 ,与本研究结果(1.435 hm^2)的相差幅度仅为 2.0%。刘建兴^[19]的研究结果为人均 1.960 hm^2 ,元相虎^[20]的为人均 1.708 hm^2 ,分别比本文结果高 36.6%和 19.0%。这可能是研究选择的产量因子、消费项目分类等差异造成的。

时间序列 EF 研究表明中国相间年份的人均 EF 变幅低于 $\pm 2\%$ ^[18-20]。因而,相近年份不同研究的 EF 组分具有较好的可比性基础。表 3 是本研究 EF 组分结果(1997 年)与谢高地^[21]、刘宇辉^[22]研究核算的中国 EF 组分(1995 年)的对比信息。上述两例研究采用的生产力分别为 1993 和 1995 年的值,而本研究为 1997 年值。依据 FAO 统计资料,1993 与 1995 年全球各类生产空间的平均生产力与 1997 年的差异幅度基本在 $\pm 5\%$ 以内,但 1993 年谷物与渔获量例外,它们分别比 1997 年水平低 11%和 15%。为消除生产力变化和均衡因子对 EF 组分的影响,表 3 对谷物与水产品消费的 EF 进行了适当的调整,并采用相同的均衡因子汇总人均 EF 组分。由表 3 可见,由 IOA-EF 模型得到的 EF 组分与谢高地^[20]、刘宇辉等^[22]采用 EF 基本模型法分析的结果较为一致。

表 3 不同研究的生态足迹组分构成比较

Table 3 Comparing footprint components among different researches

项目 Item	谢高地 Xie G D ^[21]		刘宇辉 Liu Y H ^[22]		本研究 This paper	
	A	P	A	P	A	P
耕地* Arable land*	0.164	24.5	0.159	23.8	0.179	27.7
草地 Grazing & pasture land	0.169	5.5	0.157	5.1	0.159	5.3
森林 Forest land	0.030	2.8	0.057	5.3	0.078	7.5
水域** Water area**	0.689	16.6	0.869	20.9	0.323	8.1
能源用地 Energy land	0.545	50.7	0.494	45.9	0.535	51.4
总计(调整值)Adjusted total	1.452	100	1.404	100	1.435	100

A: 未均衡足迹 ($\text{hm}^2 \text{cap}^{-1}$) Unweighted EF ($\text{hm}^2 \text{cap}^{-1}$); P: 占总计(调整值)的百分比(%) , Percentage of adjusted total (%); * 将 A 调整为用 1997 年全球生产力计算的面积,且谢高地^[21]研究中耕地面积调整为仅包括初级生产的足迹 A is the adjusted area based on global yield in 1997, and arable land in Xie G D^[21] is adjusted to EF needed by primary production; ** 人均水产品消费量调整为 1997 年值 Per capita aquatic production consumption is adjusted to the level in 1997

3.3 对投入产出法的探讨

IAO-EF 模型承袭了 EF 基本模型的基本理念,认为社会经济代谢的 EF 是支持其表观消费量(= 生产量 + 进口量 - 出口量)所需的生态生产性空间。但两者的计算依据有所不同。EF 基本模型依据单位面积生产力将资源的表观消费量(实物量)折算为 EF 组分,而(货币型)IAO-EF 模型依据单位产值的土地占用将产品的表观消费量(货币量)折算为 EF 组分,然后它们都通过产量因子与均衡因子调整,汇总为全球生物生产力表达的面积。理论上,两种算法得到的生态足迹及其组分结果是一致的。

从本文及已有基于投入产出法的 EF 研究^[4-9]可以看出,IOA-EF 模型不仅拥有 EF 基本模型的优点,还具有如下特征:(1)基于投入产出表得到的 EF 结果既能反映区域的综合生态空间需求,又能反映不同部门的完全生态空间需求,包括直接占用和间接占用,因而有助于识别区域环境影响发生的真实位置;(2)由 IOA-EF

模型得到的结果能表达区域的 EF 组分格局,又可展现区域 EF 组分在不同生产与消费部门的流转情况,这改进和提高了 EF 基本模型的结构性;③投入产出表提供的完全需求系数可以避免 EF 基本模型面临的产品与原材料相互转化及重复计算的问题,有利于提高分析结果的准确性与可靠性。

应注意的是,IOA-EF 模型并没有解决基本模型面临的生态影响核算不完全的缺陷,同时不可避免地具有投入产出分析的内在缺陷。投入产出分析的同质性假设、线性生产函数假设、部门产品的货币量与实物量换算系数均等假设,以及投入产出表没有考虑非货币性劳动等都不同程度影响着 EF 分析结果的准确性^[4,5]。详细的部门与中间投入划分和选用合适类型的投入产出表有助于克服 IOA-EF 模型的上述不足。

References :

- [1] Wang S H, Mao H Y, Wang Z J. Progress in research of ecological footprint all over the world. *Journal of Natural Resources* 2002, 17 (6) :776 - 782.
- [2] Long A H, Zhang Z Q, Su Z Y. Review of progress in research on ecological footprint. *Advances in Earth Science*, 2004, 19 (6) :971 - 981.
- [3] Wackernagel M and Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers, Philadelphia, PA. 1995.
- [4] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, *et al.* New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy, *Ecological Economics*, 1998, (27) :149 - 160.
- [5] Lenzen M and Murray S A. A modified ecological footprint and its application to Australia, *Ecological Economics*, 2001, (37) :229 - 255.
- [6] McDonald G and Patterson D M. Ecological footprints of New Zealand and its regions, 1997/1998, 2003 <http://www.mfe.govt.nz/publications/ser/eco-footprint-sep03/index.html>.
- [7] Ferng J-J. Using composition of land multiplier to estimate ecological footprint associated with production activity. *Ecological Economics*, 2001, (37) :159 - 172.
- [8] Ferng J-J. Toward a scenario analysis framework for energy footprints. *Ecological Economics*, 2002, (40) :53 - 69.
- [9] Hubacek K and Giljum S. Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprint) of international trade activities, *Ecological Economics*, 2003, (44) :137 - 151.
- [10] Lai L, Huang X J, Liu W L *et al.* Adjustment for regional ecological footprint based on input-output techniques: a case study of Jiangsu Province in 2002. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (4) :1285 - 1292.
- [11] He Q X. *Input-output analysis*. Beijing: Science Publishing Company, 1999. 5.
- [12] Zhong Q F. *Input output analysis*. Financial and Economic Publishing, 1986. 37 - 67.
- [13] National Economical Account Department, National Bureau of Statistics of China. *China Input-output analysis in 1997*. Beijing: China Statistic Publish, 1999.
- [14] National Bureau of Statistics of China. *China. Statistical Yearbook 1999*. Beijing: China Statistic Publish, 1999.
- [15] National Bureau of Statistics of China. *China. Energy Statistical Yearbook, 1997 - 1999*. Beijing: China Statistic Publish. 2001.
- [16] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K-H, *et al.* Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea of 1961 - 1999: comparing the conventional approach to an "actual land area" approach, *land use policy*, 2004, (21) :261 - 269.
- [17] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* National natural capital accounting with the ecological footprint concept, *Ecological Economics*. 1999, (29) :375 - 390.
- [18] Liu Y H. The analysis of China's human-environment relationship fluctuations between 1961 - 2001: study based on the EF (ecological footprint) model. *Economic Geography* 2005, 25 (2) :219 - 223.
- [19] Liu J X, Gu X W, Li G J, *et al.* Economic development and ecological footprint in China. *Resources Science*, 2005, 27 (3) :33 - 39.
- [20] Yuan X H, Li H, Chen B. Dynamic analysis of sustainable development in China based on the ecological footprint. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15 (3) :38 - 42.
- [21] Xie G D, Lu C X, Cheng S K, *et al.* Evaluation of natural capital utilization with ecological footprint in China. *Resources Science*, 2001, 23 (6) :20 - 23.
- [22] Liu Y H, Peng X Z. Time series of ecological footprint in China between 1962 - 2001: calculation and assessment of development sustainability. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (10) :2257 - 2262.

参考文献:

- [1] 王书华,毛汉营,王忠镜. 生态足迹的国内外近期进展. *自然资源学报* 2002, 17 (6) :776 ~ 782.

- [2] 龙爱华, 张志强, 苏志勇. 生态足迹评介及国际研究前沿. 地球科学进展, 2004, 19 (6) 971 ~ 981.
- [10] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以 2002 年江苏省经济为例. 生态学报, 2006, 26 (4) :1285 ~ 1292.
- [11] 何其祥. 投入产出分析. 北京: 科学出版社, 1999. 5.
- [12] 钟契夫. 投入产出分析. 北京: 中国财政经济出版社, 1986. 37 ~ 67.
- [13] 国家统计局国民经济核算司. 1997 年度中国投入产出表. 北京: 中国统计出版社, 1999.
- [14] 国家统计局. 中国统计年鉴 1999. 北京: 中国统计出版社, 1999.
- [17] 林贤郁. 中国能源统计年鉴 1997 ~ 1999 年. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [18] 刘宇辉. 中国 1961 ~ 2001 年人地协调度演变分析——基于生态足迹模型的研究. 经济地理, 2005, 25 (2) 219 ~ 223.
- [19] 刘建兴, 顾晓薇, 李广军, 等. 中国经济发展与生态足迹的关系研究. 资源科学, 2005, 27 (3) 33 ~ 39.
- [20] 元相虎, 李华, 陈彬. 基于生态足迹模型中国可持续发展动态分析. 中国人·资源与环境, 2005, 15 (3) 38 ~ 42.
- [21] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁, 等. 中国的生态空间占用研究. 资源科学, 2001, 23 (6) 20 ~ 23.
- [22] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹与可持续发展性评估. 生态学报, 2004, 24 (10) 2257 ~ 2262.