

基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析

张恒义^{1,*}, 刘卫东¹, 林育欣^{1,2}, 单娜娜^{1,3}, 王世忠^{1,4}

(1. 浙江大学公共管理学院, 杭州 310029; 2. 厦门大学, 厦门 361005;
3. 新疆农业科学研究院土壤肥料研究所, 乌鲁木齐 830000; 4. 浙江财经学院, 杭州 310018)

摘要: 在全球公顷和国家公顷的模型基础上, 建立了省公顷生态足迹模型。采用 2005 年浙江省平均土地单位产量核算了浙江省各地的生态足迹, 并与全球公顷和国家公顷法的结果进行了比较分析。从省公顷模型的结果可以看出, 浙江省生态足迹达 $1.18\text{s-nhm}^2/\text{人}$ (省公顷, 记为: s-nhm^2), 而生物承载力只有 $0.24\text{s-nhm}^2/\text{人}$, 生态赤字达 $0.94\text{s-nhm}^2/\text{人}$, 生态压力指数达 4.91, 是典型的生态赤字地区。另外, 浙江省各地生态足迹空间差异较大, 与全省平均水平相比, 舟山和温州处于高强度生态压力, 宁波、杭州、台州、金华和绍兴处于中强度生态压力, 而丽水、衢州、湖州和嘉兴处于低强度生态压力。最后借助 IPAT 的分析, 发现杭州、金华、嘉兴、湖州和衢州等地的万元 GDP 占用足迹不同程度地高于全省平均水平, 并指出在一定条件下, 应结合当地的经济发

关键词: 省公顷; 生态足迹; 空间差异; 可持续发展

文章编号: 1000-0933(2009)05-2738-11 中图分类号: Q149 文献标识码: A

A modified ecological footprint analysis to a sub-national area: the case study of Zhejiang Province

ZHANG Heng-Yi^{1,*}, LIU Wei-Dong¹, LIN Yu-Xin^{1,2}, SHAN Na-Na^{1,3}, WANG Shi-Zhong^{1,4}

1 College of Public Administration, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2 Xiamen University, Xiamen 361005, China

3 The Soil and Fertilizer Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, China

4 Zhejiang University of Finance and Economy, Hangzhou 310018, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2738 ~ 2748.

Abstract: The ecological footprint model on the basis of sub-national hectare was presented in this paper according to the ecological footprint concept and model on the basis of global hectare or national hectare. The ecological footprint and its composition of each city in Zhejiang Province were evaluated and analyzed by using the modified model and the actual yield per unit area of Zhejiang in 2005. The results were compared with those which were evaluated in global hectare or national hectare method, and the differences were analyzed among them. When using sub-national hectare as the evaluation criterion, the ecological footprint, the ecological capacity and the ecological deficit of Zhejiang Province in 2005 would be $1.18\text{s-nhm}^2/\text{cap}$, $0.24\text{s-nhm}^2/\text{cap}$ and $0.94\text{s-nhm}^2/\text{cap}$ respectively, and the ecological pressure index was 4.91. The results suggest that Zhejiang Province is a representative area that has a large ecological deficit and high ecological pressure. They also suggested that there was a significant spatial difference according to the ecological footprint and its composition among the cities of Zhejiang. Compared with the average level of city ecological footprint in Zhejiang Province, Lishui, Quzhou, Huzhou and Jiaxing were in low ecological pressure states, and Ningbo, Hangzhou, Taizhou, Jinhua and Shaoxing were in middle ecological pressure states, while Zhoushan and Wenzhou were in high ecological pressure states. In the end, by applying IPAT, more eco-footprint demand of 10^4 yuan GDP was found in Hangzhou, Jinhua, Jiaxing, Huzhou and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40471055)

收稿日期: 2008-01-18; 修订日期: 2008-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghyi@gmail.com

Quzhou, which have a higher level than the average of Zhejiang, and suggestions were proposed that the level of local economic development must be considered to promote resource use efficiency.

Key Words: sub-national hectare; ecological footprint; spatial difference; sustainable development

“生态足迹(ecological footprint)”是由 Rees 于 1992 年提出的^[1],经过 Wackernagel 和 Rees 发展为生态足迹分析法(eco-footprint Analysis)^[2],并得到广泛应用。Wackernagel 等采用世界平均产量分析了意大利 1993 年的生态足迹^[3];Van Vuuren 等利用地方实际单产法对贝宁湾、不丹、哥斯达黎加和荷兰的生态足迹进行核算^[4];Haberl 等利用世界单产和地方实际单产法对奥地利的生态足迹进行核算和比较^[5];Erb 以当地的平均生产力为标准对奥地利的生态足迹进行了纵向分析^[6]以及 Mathis Wackernagel 选择奥地利、菲律宾、韩国作为案例,采用“全球公顷(global hectares, gha、ghm²)”与“真实土地面积(local hectares actual land use)”两种方法测算并比较了 3 个国家 1961 ~ 1999 年间的生态足迹总量、生态足迹土地类型构成、产业部门生态足迹及其演变特征^[7]等等,这些研究都以国家为比较对象,也多采用全球公顷作为核算标准。Bagliani 等人利用当地平均单产,以全球公顷为标准面积对意大利的 Siena 省的各县进行了区域比较分析^[8],虽然它分析了省级及以下层面的生态足迹,但它仍然采用的是全球公顷模型。

生态足迹的概念自 2000 年徐中民、杨开中等学者将其引入国内以来^[9~11],在国内迅速成为新兴的研究热点。国内研究集中在国家、省级行政区和城市的生态足迹分析^[12~16],也有空间尺度更小的县和镇的应用分析^[17,18],但都采用的是世界单产法,以全球公顷为标准。陈敏等采用中国实际单产法计算和分析了 2002 年中国各省市生态足迹及其构成^[19],顾晓薇和刘建兴等在国内首先构建了国家公顷(national hectares, nhm²)模型,并通过该模型计算分析了沈阳市和东三省的生态足迹^[20,21],吴开亚等分别采用全球公顷法和国家公顷法对安徽省 2003 年的生态足迹进行核算,并对其差异进行了比较分析^[22]。至此国内有关亚国家尺度上的生态足迹模型研究才出现。

生态足迹模型本身就是一个与空间尺度密切相关的模型^[23],以全球公顷为标准进行生态足迹核算适于国家层面的分析和比较,但在进行国家级以下不同省、市生态足迹比较和结果分析时,采用全球统一的均衡因子和全国统一的产量因子,无法精确反映各省、市的实际生产力状况和区域发展特征^[22]。因此本研究在全球公顷和国家公顷法的基础上,构建了浙江省实际单产和省公顷(sub-national hectares, s-nhm²)模型,并计算了 2005 年浙江省各地的生态足迹。然后,对 3 种方法的结果进行了比较,利用省公顷的结果分析了浙江省各地的生态空间的供需状况的空间差异,最后利用生态足迹的结果分析了各地社会富裕度,经济发展水平和技术发展水平的关系特征,指出其不同的政策含义。

1 省公顷模型的构建及数据来源

生态足迹分析模型将地球上的生物生产性土地分为 6 大类:耕地、牧草地、林地、渔业水域(包括部分海洋)、建设用地和化石能源土地,并且认为这 6 类土地类型相互独立地为人类提供生态产品及服务^[2,24]。它基于六项基本前提把 6 类相互排斥的生物生产性土地通过均衡因子和产量因子调整后汇总在一起,并采用标准化面积表达结果,考查对象一般以行政区划为界,时间核算单位为 1 个年度。下述模型中所涉及数据除另作说明外,均指在一定行政区内的年度数据。

1.1 省公顷模型的构建基础

1.1.1 “省公顷”——省域土地平均生产力的标准面积

省公顷并不是一个单纯的土地面积单位,更重要的是指单位省公顷土地的平均生物生产力。它是全部生物生产性土地(陆地和水域)的生产力的平均值,也即 1 单位省公顷生物生产性土地上的平均生物产出量。假如一个省份所拥有的全部生物生产性土地为 $Q(\text{hm}^2)$,一年内产出的全部生物量为 $M\text{kg}$,那么该省份的生物生产性土地的平均生产力就是 $M/Q(\text{kg}/\text{hm}^2)$,即一单位省公顷就等于能够生产 $M/Q\text{kg}$ 生物量的生物生产

性土地的面积。例如耕地生产力一般高于全省土地的平均生产力,所以 1hm²的耕地转化成省公顷之后往往会大于原来的数值,而牧草地的生产力比较低经过换算可能小于原来的数值。

值得注意的是在确定省公顷的平均产量时,各种类型的生物产品直接加和会降低其科学性,例如 1kg 的谷物和 1kg 的鱼类直接相加会得出无意义的数字。因此,需将不同类型的生物产品转换成性质统一的形式,然后可加和平均。生态系统中的物质循环无不包涵着能量的流动、转化和储存等^[25],本文将生物产品转化成简单而统一的热值形式进行核算。

1.1.2 省公顷模型中的转换因子

(1) 均衡因子

生态足迹模型中的均衡因子是指给定年份的考察对象范围内某类生物生产性土地的平均生物生产力与该区域所有生物生产性土地的平均生物生产力的比值。公式可表达如下:

$$q_i = \frac{\bar{P}_i}{P} = \frac{Q_i}{S_i} \left/ \frac{\sum_k Q_k}{\sum_k S_k} \right. = \frac{\sum_k p_k^i \cdot \gamma_k^i}{S_i} \left/ \frac{\sum_k \sum_k p_k^i \cdot \gamma_k^i}{\sum_k S_k} \right. \quad (1)$$

式中, q_i 是指省域第 i 类土地的均衡因子(s-nhm²/hm²); $\bar{P}_i$ 是指省域第 i 类土地的平均生产力(kJ/hm²); P 是指省域内全部土地的平均生产力(kJ/hm²); Q_i 是指省域第 i 类土地的总生物量(kJ); S_i 是指省域第 i 类土地的生物生产面积(hm²); p_k^i 指省域第 i 类土地的第 k 种生物产品产量(kg); γ_k^i 指第 i 类土地上第 k 种生物产品的单位热值(kJ/kg)。

(2) 产量因子

产量因子等于各地市某类土地的平均生产力除以该省的同类土地的平均生产力。具体计算公式如下:

$$y_i^j = \frac{\bar{P}_i^j}{P_i} = \frac{Q_i^j}{S_i^j} \left/ \frac{Q_i}{S_i} \right. = \frac{\sum_k (p_k^i)^j \cdot \gamma_k^i}{S_i^j} \left/ \frac{\sum_k p_k^i \cdot \gamma_k^i}{S_i} \right. \quad (2)$$

式中, y_i^j 指 j 市第 i 类土地的产量因子; $\bar{P}_i^j$ 指 j 市第 i 类土地的平均生产力(kJ/hm²); Q_i^j 指 j 市第 i 类土地的总产出(kJ); S_i^j 指 j 市第 i 类土地的总面积(hm²); $(p_k^i)^j$ 指 j 市第 i 类土地的第 k 种产品的年产量(kg);其它参数含义同上。

这里引入的各种生物产品的单位热值 γ ,是为了将各种生物产品转化成可以直接相加的形式,各种生物产品的热值来自《农业技术经济手册(修订本)》。全球公顷法中的均衡因子和产量因子引用 wackernagel 等人的值^[3,14];国家公顷法中均衡因子的值采用顾晓薇、刘建兴等人的数据^[20,21],浙江省的产量因子按照公式(2)计算;省公顷模型中的值按公式(1)、(2)计算^[26],各种生物产量的数据来自《中国农业年鉴 2006》^[27]和《浙江省农村统计年鉴 2006》^[28],各种土地资源面积来自《中国统计年鉴 2006》^[29]和《浙江省国土资源统计公报 2005》^①。

2.2 省公顷模型中生态足迹及生物承载力的计算方法

2.2.1 生物资源类

耕地、牧草地、林地和渔业水域为人类社会提供了必需的可更新生物资源。这类土地的生态足迹面积是依据消费产品量计算转化而来。公式如下:

$$ef_i = q_i \cdot \sum_k a_k^i = q_i \cdot \sum_k \frac{c_k^i}{p_k^i} \quad (3)$$

式中, ef_i 为各地市第 i 类土地类型人均生态足迹面积; q_i 为第 i 类土地的均衡因子; a_k^i 为第 i 类土地上的第 k 中生物产品转化的土地面积; c_k^i 为各地市第 i 类土地上第 k 中产品的人均年消费量; p_k^i 为省域第 i 类土地

① 浙江省国土资源厅,《浙江省国土资源统计公报 2005》

第 k 种产品的平均单位产量。

浙江省及各市的人均年实物消费量均来自各地的统计年鉴,或以年总生物产量做贸易调整后再求得人均年实物消费量作为缺少项的补充^[3,24]。消费额调整的计算公式如下:

$$c_k^i = \frac{P_k^i - E_k^i + I_k^i}{N} \quad (4)$$

式中, P_k^i 为第 i 类土地第 k 种产品的年总产量; E_k^i 为该产品的年出口量; I_k^i 为该产品的年进口量; N 为该地区的总人口。以这种年总产量调整作为净消费额的产品为个别情况,其中还主要是林产品,而这类足迹较小,可忽略这种方法带来的误差。

这四类土地的生物承载力的计算,是将各地市的各类土地现状面积转化成省公顷面积,生物承载力面积实际是一种潜在的所有生物生产性面积。公式如下:

$$bc_i = a_i \cdot q_i \cdot y_i = \frac{A_i}{N} \cdot q_i \cdot y_i \quad (5)$$

式中, bc_i 为各地市第 i 类人均生物承载力面积; a_i 为各地市第 i 类土地的人均拥有面积; A_i 各地市的第 i 类土地现状面积; y_i 为各地市第 i 类土地的产量因子; q_i, N 含义同上。

其中水域面积只考虑内陆水面,因海洋利用面积数据难以获取,数据主要来自《中国统计年鉴 2006》和《浙江省国土资源统计公报 2005》。

2.2.2 化石能源类

这类土地是反应人类经济活动所消耗的化石燃料给生态环境造成的压力,可以从自然资本的可持续维护角度解决,也可以从化石燃料排放的废弃物的吸收转化所需的生态服务角度来解决,由此衍生出两种方法:替代法和碳汇法^[24]。碳汇法的采用较为普遍,其方法如下:

$$ef_c = \frac{f \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right)}{\omega} \quad (6)$$

式中, ef_c 为吸纳化石能源排放 CO_2 的人均土地足迹; f 为人均 CO_2 排放量; ω 为每公顷森林每年可吸纳的 CO_2 量。据 IPCC 的报告显示排放到大气中的 CO_2 并非全部被森林吸纳,据估计海洋吸收的 CO_2 占总量的 1/3; 森林对 CO_2 的吸纳效率为全球平均每年每公顷林地可吸纳 CO_2 形式的 C 元素 1.00t (FAO 的值是 1.09t), 转换成 CO_2 就是 3.67t^[30]。

人均每年消耗的化石能源排放的 CO_2 量可根据 1990 年美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 提出的化石燃料燃烧排放二氧化碳的计算方法^[31] 得到,燃煤排放二氧化碳的计算式为:

$$f = m \times 0.982 \times 0.73257 \quad (7)$$

式中, f 为人均 CO_2 排放量; m 为人均标准煤年消耗量; 0.982 为有效氧化系数, 0.73257kg/t 为每吨标准煤的含碳量。浙江省各地的能源消耗量来自《2005 年浙江省能源与利用状况》(白皮书)^①。

计算 CO_2 吸纳的土地占用是一种“假想”出来的土地面积,实际中并未存在,所以其生态承载力面积为 0。

2.2.3 建设用地的足迹及承载力

建设用地的生态足迹的计算方法与其承载力的计算方法相同,需要注意的是建设用地足迹包括了能源帐户中的水电用地的生态足迹,其计算方法略有不同(只在水电用地的数据资料可获得时采用,比如可以从建设用地中区分出水电用地,否则只能做一般建设用地考虑),建设用地的均衡因子和产量因子均取耕地的相应值,而水电用地的均衡因子取 1^[24,32]。计算方法如下:

$$\text{人均建设用地生态足迹} = \text{人均建设用地生物承载力} = \text{人均建设用地面积} \times \text{均衡因子} \times \text{产量因子} \quad (8)$$

$$\text{人均水电用地的生态足迹} = \text{人均水电年消耗量} \times \text{折算系数} \times \text{水电用地的均衡因子} \quad (9)$$

① 浙江省经济贸易委员会,浙江省统计局.《2005 年浙江省能源与利用状况》. www.zjjmw.gov.cn.

折算系数采用 Wackernagel 等人的数据^[3,33]。浙江省水电年消耗量来自《2005 年浙江省能源与利用状况》中的电力总消耗,扣除火电和热电部分,核电按水电处理。

2.3 生态赤字及生态压力指数

生态足迹表达了一定区域内人类维持一定的消费水平所必需的生物生产性土地的面积,将其同该区域范围所能提供的所有生物生产性土地面积(生态承载力)进行比较,就能为判断一定区域的现有生态系统承载力是否足以满足当地生产消费活动提供定量的依据。

生态赤字是指某区域的生物承载力与生态足迹的差值;生态压力指数是指某区域的生态足迹与生物承载力的比值^[34],来综合考虑该地区的生态安全状况。公式如下:

$$\begin{aligned} ed &= bc - ef \\ t &= ef/bc \end{aligned} \quad (10)$$

式中, ed 为某区域的人均生态赤字; t 为区域的生态压力指数; bc 为该区域的人均生物承载力(扣除 12% 以保留生物多样性); ef 为该区域的人均生态足迹。

3 结果与分析

3.1 3 种方法的结果比较分析

本文列出了 3 种方法的最终汇总结果,如下表 1、表 2 和表 3 所示^①。

表 1 全球公顷法浙江省 2005 年生态足迹汇总

Table 1 Ecological footprint summary of Zhejiang in global hectare (2005)

土地类型 Land categories	人均生态足迹 Per capita eco-footprint			人均生物承载力 Per capita bio-capacity		
	需求面积 (hm ² /人)	均衡因子 (ghm ² /hm ²)	生态足迹 (ghm ² /人)	实际面积 (hm ² /人)	产量因子	生物承载力 (ghm ² /人)
	Demand areas	Equivalence factor	Eco-footprint	Land areas	Yield factor	Bio-capacity
	(hm ² /cap)	(ghm ² /hm ²)	(ghm ² /cap)	(hm ² /cap)		(ghm ² /cap)
耕地 Cropland	0.354039	2.80	0.9913	0.056563	1.66	0.2629
草地 Pasture	0.068556	0.50	0.0343	0.009597	0.19	0.0009
林地 Forest	0.115293	1.10	0.1268	0.122129	0.91	0.1223
水域 Fisheries	0.049345	0.20	0.0099	0.018371	1.00	0.0037
建设用地 Built-up area	0.020444	2.80	0.0950	0.020444	1.66	0.0950
化石能源地 Fossil Fuels	0.524754	1.10	0.5772	—	—	0.0000
				减去保留生物多样性土地(12%) Minus 12% for biodiversity		0.0582
汇总 Total		1.8345			0.4266	

表 2 国家公顷法浙江省 2005 年生态足迹汇总

Table 2 Ecological footprint summary of Zhejiang in national hectare (2005)

土地类型 Land categories	人均生态足迹 Per capita eco-footprint			人均生物承载力 Per capita bio-capacity		
	需求面积 (hm ² /人)	均衡因子 (ghm ² /hm ²)	生态足迹 (ghm ² /人)	实际面积 (hm ² /人)	产量因子	生物承载力 (ghm ² /人)
	Demand areas	Equivalence factor	Eco-footprint	Land areas	Yield factor	Bio-capacity
	(hm ² /cap)	(ghm ² /hm ²)	(ghm ² /cap)	(hm ² /cap)		(ghm ² /cap)
耕地 Cropland	0.320628	5.25	1.6833	0.056563	1.01	0.2999
草地 Pasture	0.360824	0.09	0.0325	0.009597	4.10	0.0035
林地 Forest	0.126483	0.21	0.0266	0.122129	3.25	0.0834
水域 Fisheries	0.011042	0.14	0.0015	0.018371	0.74	0.0019
建设用地 Built-up area	0.020444	5.25	0.1084	0.020444	1.01	0.1084
化石能源地 Fossil Fuels	0.524754	0.21	0.1102	—	—	0.0000
				减去保留生物多样性土地(12%) Minus 12% for biodiversity		0.0597
汇总 Total		1.9625			0.4375	

① 在计算过程中,涉及了浙江省 11 个地市的 50 余项条目的整理和汇总。

表3 省公顷模型计算的浙江省 2005 年生态足迹汇总 (s-nhm²/人)
Table 3 Ecological footprint summary of Zhejiang in sub-national hectare (2005) (s-nhm²/cap)

项目 Categories	人均生态足迹 Per capita eco-footprint	人均生物承载力 Per capita bio-capacity	人均生态赤字 (-)/盈余 (+) Per capita eco-deficit (-)/surplus (+)
耕地 Cropland	0.8940	0.1661	-0.7279
草地 Pasture	0.0173	0.0011	-0.0162
林地 Forest	0.0118	0.0418	+0.0300
水域 Fisheries	0.0037	0.0031	-0.0006
建设用地 Built-up area	0.0653	0.0606	-0.0047
化石能源地 Fossil Fuels	0.1836	0.0000	-0.1837
汇总 Total	1.1758	0.2400 ^①	-0.9032

①减去 12% 的生物多样性有地 Minus 12% for biodiversity

从表 1、表 2 和表 3 的结果可得,以全球公顷法计算的浙江省 2005 年的人均生态足迹为 1.8345ghm²/人,人均生物承载力为 0.4266ghm²/人,人均生态赤字为 1.4079ghm²/人;国家公顷法计算的结果显示,人均生态足迹为 1.9625nhm²/人,人均生物承载力为 0.4375nhm²/人,人均生态赤字为 1.5250nhm²/人;采用省公顷模型计算的结果分别为,人均生态足迹 1.1758s-nhm²/人,人均生物承载力 0.2400s-nhm²/人,人均生态赤字 0.9358s-nhm²/人。总体上说,省公顷模型的结果均比前两者偏小,但是这 3 种方法得出的浙江省 2005 年的生态压力指数都达到了 4 以上,也即浙江省所占用的生态空间是其实际土地面积的 4 倍还要多,或者说,浙江省自身拥有的自然资本要衍生 4 年多的生态产品和服务,仅能供应其 1 年的消费。而据《生命星球报告 2006》,中国的生态压力指数为 2^①,浙江省的压力指数是中国平均水平的 2 倍以上,从这个意义上看,浙江省是一个高生态压力和生态赤字地区,其对生态环境的冲击应该引起重视。

在总人均生态足迹构成中,耕地和化石能源用地所占比重最大,3 种方法中计算结果差别最大的也是这两项。人均耕地生态足迹在全球公顷法、国家公顷法和省公顷法中的值分别为,0.99ghm²/人,1.68nhm²/人和 0.89s-nhm²/人;这 3 种方法得到的人均化石能源用地足迹的数值分别为,0.58ghm²/人,0.11nhm²/人和 0.18s-nhm²/人。造成这种差别的原因主要有两个:其一,从人均实物消费量转化到生物生产性土地过程中,土地的单位面积产量差异较大,单产越高相同的实物量转化来的相应的生物生产性土地面积越小,比如粮食的单位面积产量,全球的平均产量要远低于中国和浙江省的平均值;其二,在把实地占用面积转换到标准的均衡面积时,均衡因子的差异又起了很大的影响,比如耕地的均衡因子全球公顷法中为 2.8ghm²/hm²,国家公顷法中为 5.25nhm²/hm²,省公顷法中为 2.82s-nhm²/hm²;而化石能源用地的均衡因子依据林地的均衡因子分别为 1.1ghm²/hm²,0.21nhm²/hm²和 0.35s-nhm²/hm²。同样,造成生物承载力的结果的差异也是由这两个转换因子的不同引起,因为在实地面积转换到生物承载力标准面积时都要乘以相应的均衡因子和产量因子。

由于模型的参数不同最后的结果也会不同,采用省公顷法测算的结果显示浙江省 2005 年存在较低的生态赤字,该方法是根据浙江省实际土地的生产力确定的模型参数,更加真实地反映了当地的具体发展状态。生态足迹模型具有强烈的空间尺度依赖性,用大空间尺度的模型参数测算较小尺度的生态足迹时,往往会由于参数的失真而造成较大误差。尤其对于核算国家范围内部的生态足迹时,在相同的数据来源和核算模式下,采用国家公顷法比采用全球公顷法更能减少系统误差,更接近真实地反映实际生态足迹状况^[22]。同样在核算省级以下层面的生态足迹时,更宜采用省公顷模型法。

3.2 生态足迹的空间差异分析

采用省公顷模型测算了 2005 年浙江省 11 个地市的生态足迹,结果呈现出较强的空间差异性(表 4)。总体上看,2005 年浙江省的生态足迹为 1.18s-nhm²/人,其中人均耕地足迹为 0.89s-nhm²/人,占总人均足迹的

① 《生命星球报告 2006》是根据世界上国家总人口超过 1 亿的各国(除个别国家)的 2003 年统计数据建立的生态足迹帐户,其中中国的人均生态足迹为 1.6ghm²/人,人均生物承载力为 0.8ghm²/人;http://assets.panda.org/downloads/living_planet_report.pdf.

75%以上,是比重最大的一项;其次是人均化石能源用地足迹 $0.18s-nhm^2/人$,占人均总足迹的15%左右;比例最小的是水域足迹人均 $0.004s-nhm^2/人$,所占比重还不到1%。各市的人均生态足迹由大到小依次为:杭州,嘉兴,金华,湖州,衢州,丽水,绍兴,台州,温州,宁波和舟山。各市的生态足迹的构成与浙江省总体水平一致,均是耕地足迹比重最大,其次是化石能源用地足迹。排在前位的人均总生态足迹较大的几个地市其人均耕地足迹数值都明显偏大,直接导致了人均总生态足迹数值的偏大,例如杭州的人均耕地足迹占其总足迹的72%左右,金华更达83%左右,而嘉兴也有74%。生态足迹实际上是折射一个地区人类活动的自然资本的消费,也就是对自然资本的直接和间接的需求,人均耕地足迹所占比重偏大说明了该地区对食物的消费很大。在计算过程中,按照wackernagel的经典模型^[3]耕地是广义上的,包括提供水果的园地和提供猪肉、禽肉和禽蛋的养殖土地,这也导致了人均耕地足迹的比重较大。特别是禽畜产品的消耗,由于土地只提供初级产品用来饲养禽畜,然后供人类消费用的是肉类和禽蛋的次级产品,由于能量在食物链中的耗散,最终人类获得的产品必然要转化成更大的耕地足迹^[24]。另外,化石能源用地的人均足迹,它反映了人均化石能源的消耗量,各市的人均化石能源用地足迹的大小依次为:宁波,杭州,绍兴,嘉兴,舟山,湖州,衢州,金华,温州,台州和丽水。排在前位的5个地市是经济较为发展,人均GDP在浙江省也排在前列,这些地区能源消耗的工业经济比重较大,特别是舟山,因其海岛的地理特点,资源局限比较大,各种资源的替代消费效应不明显,造成化石能源足迹偏大。

表4 省公顷法2005年浙江省各地的生态足迹汇总

Table 4 Ecological footprint summary of each city of Zhejiang in sub-national hectare (2005)

地点 Site	人均生态足迹 ($s-nhm^2/人$) Per capita eco-footprint ($s-nhm^2/cap$)	人均生物承载力 ($s-nhm^2/人$) Per capita bio-capacity ($s-nhm^2/cap$)	人均生态赤字/盈余 ($s-nhm^2/人$) Per capita eco-deficit(-) /surplus(+) ($s-nhm^2/cap$)	生态压力指数 Ecological press index
浙江省 Zhejiang	1.18	0.24	-0.94	4.91
杭州市 Hangzhou	1.64	0.32	-1.32	5.18
宁波市 Ningbo	0.95	0.23	-0.72	4.11
温州市 Wenzhou	0.97	0.11	-0.86	8.87
嘉兴市 Jiaxing	1.37	0.49	-0.88	2.81
湖州市 Huzhou	1.27	0.47	-0.80	2.68
绍兴市 Shaoxing	1.06	0.28	-0.79	3.86
金华市 Jinhua	1.30	0.23	-1.07	5.64
衢州市 Quzhou	1.21	0.44	-0.78	2.76
舟山市 Zhoushan	0.85	0.10	-0.75	8.24
台州市 Taizhou	1.04	0.18	-0.86	5.86
丽水市 Lishui	1.09	0.43	-0.66	2.53

耕地和林地资源是浙江省平均生产力最强的两种土地类型,这两者构成了浙江省生物承载力的主要部分。各市生物承载力大小依次为:嘉兴,湖州,衢州,丽水,杭州,宁波,绍兴,金华,台州,温州和舟山。人均生物承载力的大小与该地区的人口密度直接相关,但其根本原因是该地区的土地资源的禀赋^[8]。耕地资源是提供生物产品能力最高的土地资源,而浙江省的各市中耕地的生产力最高的是:嘉兴,湖州,绍兴和杭州,其产量因子分别是1.73,1.25,1.15和1.13,而这些地区的土地利用结构中耕地占有所有土地面积的比重分别是,嘉兴达64%左右,湖州和绍兴分别为33%和34%,杭州的耕地比重也有19%,原因是这几个地区都分布在浙江省仅有的两个平原区域。同样,林地资源产量因子最高的地区为湖州(2.80),衢州(1.38),杭州(1.15)和丽水(1.20),而林地当地的土地利用结构中的比重分别为,湖州为37%,衢州和丽水最高分别达到80%和61%,杭州也达59%。但是浙江省的土地资源相对数并不乐观,除了林地略有盈余外,各类土地均出现不同程度的生态赤字,特别是耕地资源,生态足迹面积远远大于其拥有的耕地生物承载力面积,特别严格的保护耕

地资源对浙江省来说任重而道远。

各地市的生态赤字和生态压力指数差异很大,生态赤字最小的地区是丽水只有 $0.66\text{s-nhm}^2/\text{人}$,最大的是杭州达 $1.32\text{s-nhm}^2/\text{人}$,两者相差 2 倍;生态压力指数最大的是温州达 8.87,最小的是丽水为 2.53,前者是后者的 3 倍还要多。按照生态压力指数和生态赤字水平,可将浙江省各市划分为三大区域(图 1),浙江省的总体生态压力指数为 4.31,只有丽水、湖州、衢州和嘉兴 4 个地市明显低于这个数值,分别是丽水 2.53,湖州 2.64,衢州 2.75 和嘉兴的 2.80,而且这些地区的生态赤字也都低于浙江省平均水平 $0.90\text{s-nhm}^2/\text{人}$,在浙江省内相对处于低强度的生态压力和生态赤字区块;台州的生态压力指数为 5.86,生态赤字为 $0.86\text{s-nhm}^2/\text{人}$,金华和杭州的生态压力指数分别为 5.64 和 5.18,生态赤字也都超过了浙江省平均值,宁波和绍兴的生态压力指数为 4.11 和 3.86,生态赤字分别为 $0.72\text{s-nhm}^2/\text{人}$ 和 $0.79\text{s-nhm}^2/\text{人}$,这 5 个地区的生态压力指数分布在浙江省平均水平上下,生态赤字也在浙江省平均水平左右,相对处于中强度的生态压力和生态赤字区块;温州和舟山的生态压力指数分别为 8.87 和 8.24 远大于浙江省的平均水平,生态赤字也接近浙江省平均水平,分别达到 $0.86\text{s-nhm}^2/\text{人}$ 和 $0.75\text{s-nhm}^2/\text{人}$,相对处于高强度的生态压力和生态赤字区块。

3.3 生态、经济、社会综合分析

生态足迹的大小受该地区的人口、经济发展和技术水平等因素的影响^[24,32,35]。为了利用生态足迹概念分析生态、经济和社会之间的关系,引入 IPAT 等式加以推导和分析。美国斯坦福大学的著名人口学家埃里希(Paul R. Ehrlich)于 1971 年提出了关于环境冲击(impact)与人口(population)、富裕度(affluence)和技术(technology)三因素的恒等式^[36]:

$$I = P \times A \times T \quad (11)$$

经过学者们不断努力将其发展为 ImPACTS 等式,更有力地解释了生态、经济和社会间的复杂关系^[37]。

应用简单的 IPAT 等式加以推导应用,可以得到关于生态、经济和社会协调发展的简明而有力的证据。赋予等式左边的 I 为一个地区的总生态足迹 EF ,表示该地区对生态环境造成的冲击; P 为该地区的总人口; A 为该地区的人均 GDP,表示该地区人们的富裕度; T 为万元 GDP 占用足迹面积,代表该地区的技术水平。用公式表示如下:

$$EF = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{EF}{GDP} \quad (12)$$

假定,在一定阶段内浙江省的人口继续增加,随着经济的发展人们越来越富裕,也即人均 GDP 在不断增加,要使环境压力减小或维持不变,只有依靠提高技术减少单位经济产值对环境的压力。为此,再假定人均的环境压力为常数,表示人类社会的可持续发展模式,公式(12)可变形为:

$$\frac{EF}{GDP} = \frac{EF}{P} \times \frac{P}{GDP} \quad (13)$$

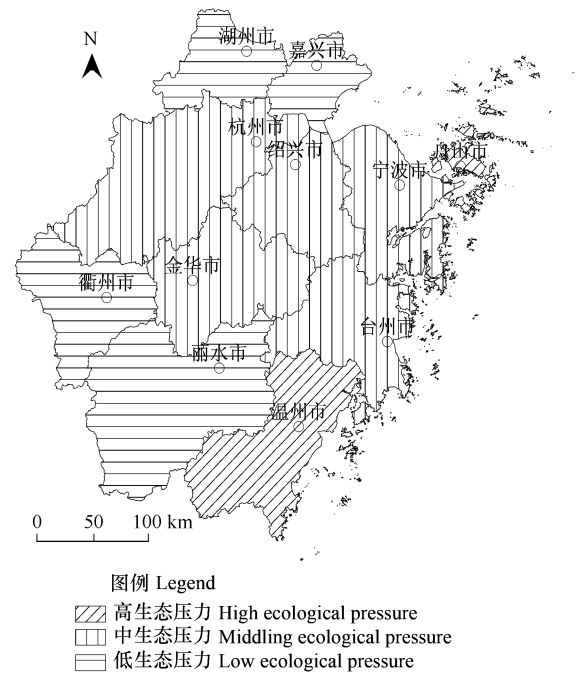


图 1 浙江省 2005 年各地生态压力的空间差异

Fig. 1 The spacial heterogeneity of Zhejiang province in 2005

杭州市 Hangzhou; 宁波市 Ningbo; 温州市 Wenzhou; 嘉兴市 Jiaxing; 湖州市 Huzhou; 绍兴市 Shaoxing; 金华市 Jinhua; 衢州市 Quzhou; 舟山市 Zhoushan; 台州市 Taizhou; 丽水市 Lishui

将 $\frac{EF}{GDP}$ 作为因变量 y ; $\frac{GDP}{P}$ 作为自变量 x ; $\frac{EF}{P}$ 为常数, 取 k 。公式(13)可表示如下:

$$Y = \frac{k}{x} \quad (14)$$

也即, y 是 x 的反比例函数, 当 k 取不同的常数时, 代表人均环境压力的不同值, k 值越小对环境的压力就越小, 则该地区可看作是处于相对可持续状态; x 越大相应的 y 值越小, 其实际含义是, 随着经济的发展, 人类应该也有能力增加更多的投入以提高技术水平, 替代原来的高消耗、高消费和高排放的经济发展模式, 变为主要以技术创新带来经济增长的发展模式。

以浙江省总体人均生态足迹为定值 ($k = 1.17$), 来考察各个地市的生态、经济和社会协调状况 (图 2)。图中的曲线表示浙江省对环境的冲击不变的情况下, 经济发展程度 (富裕度) 与经济活动的自然空间占用率 (技术水平) 之间的动态关系, 某种程度上可视为浙江省生态、经济和社会协调发展状态。若处在曲线以下区域则表明, 在相同的经济水平上, 该地区的经济活动对自然空间的占用率比浙江平均水平更低, 其技术水平较高, 对生态环境的冲击更小; 反之则表明, 在相同的经济水平上, 该地区的资源能源利用率比浙江平均水平更低, 其技术水平较低, 对生态环境的冲击更大。

不难看出, 杭州、嘉兴、湖州、金华和衢州等 5 个地区都不同程度的处于曲线以上区域。这些地区在其所处的经济发展水平上, 经济活动的自然空间占用率比浙江省平均水平高, 其经济活动中的技术水平还没达到浙江的平均值, 资源利用效率较低, 因此造成了更大的环境冲击。资源、能源利用效率和经济发展程度不匹配, 资源和能源会成为这些地区经济可持续发展的瓶颈, 为了达致经济又好又快的发展, 这些地区必须投入更多的资金和人力等要素提升其技术水平, 促使技术进步成为推动经济增长的新动力, 包括产业结构提升, 知识、技术的积累和制度创新。而浙江省另外的六个地市处在曲线下方, 在其相应的经济条件下, 资源利用效率较浙江省平均水平高, 或者说其经济活动中技术要素贡献率较大, 所以这些地区应当在确保当前技术水平不降低的前提下, 快速发展当地经济, 保护好环境的同时不断提高人民生活的富裕度。

4 结论与讨论

本文探索并利用省公顷法核算了浙江省 2005 年的生态足迹面积, 与全球公顷法、国家公顷法的结果进行比较分析, 结果都表明浙江省是一个严重的生态赤字区域, 其生态压力指数远高于中国的平均水平。其中, 特别是耕地资源赤字更大, 受地理条件限制, 浙江省的耕地资源相对匮乏, 而它又是中国经济比较发达的地区, 居民生活消费水平较高, 这些是导致耕地赤字的两个主要原因。浙江省必须制定严格的耕地保护政策, 保证耕地资源的数量和质量, 鼓励居民改善生活方式, 倡导节约型消费。

各地生态足迹呈现了较强的空间差异性, 其原因是各地的资源禀赋和社会经济状况的不同。各地的生态赤字都很大, 按照当前的生产生活情况, 需要从该地区以外输入大量的自然产品和资源能源才能维持正常的发展。生态足迹受到人口、经济发展和技术水平等因素的综合作用, 那么在对某一区域做生态足迹分析时, 应根据不同的经济发展水平, 提出适当的减小生态足迹或环境冲击的对策和建议, 抛开经济基础只谈技术影响的建议只能是空中楼阁。技术水平的提升, 无论是技术自主创新, 还是先进技术的引进都要依托大量经济和

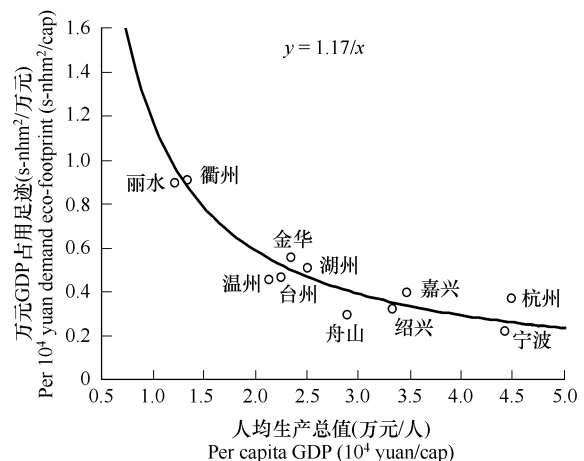


图 2 浙江省 2005 年各地生态、经济和社会 IPAT 分析

Fig. 2 Ecological, economic and social IPAT analysis of Zhejiang province in 2005

杭州 Hangzhou; 宁波 Ningbo; 温州 Wenzhou; 嘉兴 Jiaxing; 湖州 Huzhou; 绍兴 Shaoxing; 金华 Jinhua; 衢州 Quzhou; 舟山 Zhoushan; 台州 Taizhou; 丽水 Lishui

人力等的投入,经济基础相对薄弱时对提升技术水平的不相称的投入,片面追求趋高的技术水平只会适得其反。如硬性要求丽水、台州等地达到杭州和宁波的技术水平就不现实,而丽水、台州等地的技术水平在其相应的经济发展水平上已高于浙江平均水平,杭州却还没达到相应的平均水平,所以不能一味强调较低的万元 GDP 足迹占用率,还要与其经济发展水平相适应,最终达到整个社会和生态、经济的协调共进。

省公顷生态足迹模型虽然体现了其较强的地域性、准确性的优点,但它也像传统的生态足迹模型一样具有一定的局限性,首先是统计资料的可获得性,部分数据在省级以下层面上没有进入统计;其次是模型没有考虑流动人口对流入地区的生态足迹的影响等,这可能造成对当地的生态足迹的低估;最后但不是最终的局限就是,以生物生产量贸易调整代替净消费额时,尽管可以在某种程度上进行进出口调整,但是国内交易却很难调整,影响了数据的准确性。

References:

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4 (2): 121 — 130.
- [2] Rees W E, Wackernagel M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16, 223 — 248.
- [3] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375 — 390.
- [4] Van Vuuren D P, Smeets E M W. Ecological Footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands. *Ecological Economics*, 2000, 34 (234): 115 — 130.
- [5] Haberl H, Erb K-H, Krausmann F. How to calculate and interpret Ecological Footprints for long periods of time: the case of Australia 1926 — 1995. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 25 — 145.
- [6] Erb K-H. Actual land demand of Austria 1926 — 2000: a variation on Ecological Footprint assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 247 — 259.
- [7] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K-H, *et al.* Ecological footprint time series of Austria, the Philippines and South Korea for 1961 — 1999: comparing the conventional approach to an ‘actual land area’ approach. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 261 — 269.
- [8] Marco B, Alessandro G, Valentina N, *et al.* Ecological footprint analysis applied to a sub-national area: the case of the Province of Siena (Italy). *Journal of Environ Manage*, 2008, 86(2): 354 — 364.
- [9] Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 607 — 616.
- [10] Yang K Z, Yang Y, Chen J. Ecological footprint analysis: concept, method and cases. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(6): 630 — 636.
- [11] Li L F, Cheng S K. Ecological footprint: a new indicator for sustainability. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(4): 375 — 382.
- [12] Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D, *et al.* Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 280 — 285.
- [13] Guo X R, Yang J R, Mao X Q. Calculation and analysis of urban ecological footprint: a case study of Guangzhou. *Geographical Research*, 2003, 22(5): 654 — 663.
- [14] Zhang Z Q, Xu Z M, Cheng G D, *et al.* The Ecological Footprints of the 12 Provinces of west China in 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56 (5): 599 — 610.
- [15] Li J P, Wang Z S. The analysis of ecological footprints of Macao in 2001. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 197 — 203.
- [16] Yu W J, Wu C F, Yin Q, *et al.* Study on resource-saving development based on Ecological Footprint — Taking Hangzhou city as an instance. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(6): 916 — 924.
- [17] Wang X Q, Lu Q. Natural capital accounting with the Ecological Footprint concept in Gonghe county as a desertification area, Qinghai Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(3): 12 — 18.
- [18] Yang H L, Ning F S, You X. Ecological footprints method for quantitative measurement of sustainable development of small town. *Journal of Chongqing Technol Business University (Natural Sciences Edition)*, 2006, 22(6): 253 — 256.
- [19] Chen M, Wang R S, Zhang L J, *et al.* Provincial ecological footprint of China in the year of 2002. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (3): 424 — 428.
- [20] Liu J X, Wang Q, Gu X W, *et al.* Research on regional ecological footprint based on the concept of “national hectare” — A case study of the northeast provinces of China. <http://www.paper.edu.cn>, 2007-03.
- [21] Gu X W, Wang Q, Liu J X, *et al.* New method of urban Ecological Footprint calculation based on “national hectare”. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(4): 295 — 298.
- [22] Wu K Y, Wang L J. Accounting discrepancies of Ecological Footprint based on global hectare and national hectare. *China Population · Resources and Environment*, 2007, 17(5): 80 — 83.

- [23] Wackernagel M, Silverstein J. Big things first: focusing on the scale imperative with the ecological footprint. *Ecological Economics*, 2000, 32(3): 391—394.
- [24] Monfreda C, Wackernagel M. Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 231—246.
- [25] Wackernagel M, Schulz N B, Deumling D. Tracking the ecological overshoot of the human economy, *PNAS* 2002, 99(1): 926629271. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.14033699>, 2008. 03.
- [26] Zhang H Y, Liu W D, Wang S Z, *et al.* Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on sub-national hectare: a case study of Zhejiang. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 82—92.
- [27] Editorial Board of China Agriculture Yearbook. *China Agriculture Yearbook 2006*. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [28] Zhejiang Province Bureau of Statistics. *Zhejiang Rural Statistical Yearbook 2006*. Beijing: China Statistics Press, 2006.
- [29] National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook 2006*. Beijing: China Statistics Press, 2007.
- [30] Global Footprint Network. *National Footprint Accounts 2006 Academic Edition*. http://www.footprintnetwork.org/gfn_sub.php?content=nrb
- [31] Qian J, Yu L Z. Study on Contribution of CO₂ emissions from fossil fuel in Shanghai. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, 22(11): 836—839.
- [32] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, *et al.* Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 271—278.
- [33] Zhang Q H, Xue H F, Kou X D, *et al.* Analysis on ecological footprint of Xi'an in 2004. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. ed.)*, 2007, 35(10): 110—114.
- [34] Ren Z Y, Huang Q, Li J. Quantitative analysis of dynamic change and spatial difference of the ecological safety: The case of Shaanxi Province. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 597—606.
- [35] Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D. A resolution to the conception of Ecological Footprint. *China Population · Resources and Environment*, 2006, 16(6): 69—78.
- [36] Tao Z P. *Eco-Rucksack and Eco-Footprint*. Beijing: Economic Science Press, 2003. 161—170.
- [37] Xu Z M, Cheng G D, Qiu G Y. ImPACTS identity of sustainability assessment. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 198—208.

参考文献:

- [9] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 607—616.
- [10] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 630—636.
- [11] 李利锋, 成升魁. 生态占用-衡量可持续发展的新指标. *自然资源学报*, 2000, 15(4): 375—382.
- [12] 徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280—285.
- [13] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态足迹计算与分析——以广州为例. *地理研究*, 2003, 22(5): 654—663.
- [14] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部 12 省(区)的生态足迹. *地理学报*, 2001, 56(5): 599—610.
- [15] 李金平, 王志石. 澳门 2001 年生态足迹分析. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 197—203.
- [16] 余万军, 吴次芳, 尹奇, 等. 基于生态足迹的资源节约型发展初探——以杭州市为例. *自然资源学报*, 2005, 20(6): 916—924.
- [17] 王学全, 卢琦. 生态足迹理论在青海省共和县荒漠化自然资本核算中的应用. *林业科学*, 2005, 41(3): 12—18.
- [18] 杨海林, 宁丰收, 游霞. 小城镇发展可持续性定量测度的生态足迹方法. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2006, 22(6): 253—256.
- [19] 陈敏, 王如松, 张丽君, 等. 中国 2002 年省域生态足迹分析. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 424—428.
- [20] 刘建兴, 王青, 顾晓薇, 等. 基于“国家公顷”的区域生态足迹研究——以东北三省为例. <http://www.paper.edu.cn>. 2007-03.
- [21] 顾晓薇, 王青, 刘建兴, 等. 基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法. *东北大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(4): 295—298.
- [22] 吴开亚, 王玲杰. 基于全球公顷和国家公顷的生态足迹核算差异分析. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(5): 80—83.
- [26] 张恒义, 刘卫东, 王世忠, 等. “省公顷”生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算——以浙江省为例. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 82—92.
- [27] 中国农业年鉴编辑委员会. *中国农业年鉴 2006*. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [28] 浙江省统计局. *浙江省农村统计年鉴 2006*. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [29] 中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴 2006*. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [31] 钱杰, 俞立中. 上海市化石燃料排放二氧化碳贡献量的研究. *上海环境科学*, 2003, 22(11): 836—839.
- [33] 张秋花, 薛惠峰, 寇晓东, 等. 西安市 2004 年生态足迹分析. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(10): 110—114.
- [34] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析. *地理学报*, 2005, 60(4): 597—606.
- [35] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 69—78.
- [36] 陶在朴. *生态包袱与生态足迹: 可持续发展的重量及面积观念*. 北京: 经济科学出版社, 2003. 11
- [37] 徐中民, 程国栋, 邱国玉. 可持续性评价的 ImPACTS 等式. *地理学报*, 2005, 60(2): 198—208.