生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例

徐中民, 程国栋, 张志强
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 生态足迹是一种定量测量人类对自然利用程度的新方法。通过跟踪区域的能源和资源消费, 将它们转化为提供这种物质流所必须的各种生物生产型土地类型的面积, 并同区域能提供的生物生产型土地面积进行比较, 能定量判断一个区域的发展是否处于生态承载能力的范围内。介绍了生态足迹的概念及生态足迹计算模型, 分析总结了生态足迹模型的优缺点等, 在此基础上, 对张掖地区 1995 年的生态足迹进行了实证计算和分析, 结果表明 1995 年张掖地区人均生态赤字为 0.34 hm^2。

关键词: 生态足迹; 可持续性测量; 张掖地区

Measuring sustainable development with the ecological footprint method——take Zhangye prefecture as an example

XU Zhong-Min, CHENG Guo-Dong, ZHANG Zhi-Qiang (*State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou* 730000, *China*). Acta Ecologica Sinica, **2001**, **21**(**9**): **1484~1493**.

Abstract: Humans consume the products and services of nature; every one of us has an impact on the earth. Does the human load stay within global carrying capacity? The ecological footprint concept has been designed to answer this question. The ecological footprint of any defined human population (from a single individual to a whole city or country) is the total area of ecologically productive land and water occupied exclusively to produce all the resources consumed and to assimilate all the wastes generated by the human population. The ecological footprint method presents a simple framework for national natural capital accountion.

The ecological footprint is a function of population and per capital material consumption. The model assumes that all types of energy, material consumption and waste discharge require the productive or absorptive capacity of a finite area, and the calculation of the model requires incorporation of relevant income, prevailing values, social-cultural factors and technology in the area under study. However, attempting to include all consumption items, waste types and ecosystem functions in the estimate would lead to intractable information and data-processing problems. Estimating the ecological footprint of a defined population is a multi-stage process. In this paper, we gather the multi-stage model into following equation.

$$EF = N \cdot ef, ef = \sum_{i=1}^{n} (aa_i) = \sum_{i=1}^{n} (c_i / p_i)$$

The per capita footprint (ef) is the sum of land appropriated for each purchased goods (aa_i), which is calculated by dividing average consumption of each goods (c_i) by the average productivity of each goods

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大研究("黑河流域水-生态-经济系统综合管理实验示范")(KZCX1-09-04)和"西北水资源承载力研究"(KZCX1-10-03)资助项目
收稿日期: 1999-10-25; **修订日期**: 2001-05-30
作者简介: 徐中民(1973~), 男, 湖南省长沙市人, 博士, 副研究员。主要从事生态经济研究。

(p_i), the population footprint can then be obtained by mulatiplying the per capital footprint (ef) by the population size (N).

Types of ecologically productive lands (mainly including arable land, fossil energy, residential area, pasture, forest) are addressed in detail.

We calculated the ecological footprint of Zhangye prefecture in 1995. The ecological footprint ledger is composed of three main sections. The first ledger is basic biotic resources consumption including its subproducts, the second ledger is energy consumption, the third ledger is trade balance, Trade balance through more detailed trade flow analyses can mitigate the influence of import and export product to consumption varies. Every particular on above ledger is presented from Table 1 to Table 5. Based on the ecological footprint concept and analysis framework, human consumption can be compared with natural capital production at the regional level using existing data. In the case of Zhangye prefecture, the ecological deficit of Zhangye is 0.346hm^2 per capita. Some simplification in calculation methodology results in over-optimistic estimates. Some countermeasures to decrease ecological footpring such as increasing resources utilization efficiency, change consume pattern are put forward.

The paper also analyses the advantages and disadvantages of the ecological footprint model. The ecological footpring present a simple framework for national and global natural capital accounting. Ecological footprint index is an excellent aggregate index that coonects many issues of sustainability, development and equity. The model reveals the extent to which local carrying capacity has been exceeded and allows a cumulative approach to impact analysis. The use of ecological productive area as a standard numeraire rather than money or energy, make the footprint easy to understand, and also permit provocative calculations.

Integrated with encountered some main problems in this calculation, we also the weakness of overviewed the weakness of ecological footprint method. The limitations of the model are that it doesn't include several important issues: land areas lost to biological productivity because of contamination, erosion and urban "hardening" and dissertation (especially in northwestern of China). Methodologically, the assessments could be more complete by including the ecological spaces used for freshwater use, a particular important problem in arid area in northwestern of China. At the same time, many problems relate to data available. Determined various biologically productive area is important in the calculation of bio-capacity. In the aggregate process, error may be easy resulted. For example, simple added desert steppe and everglade will result in large number in pasture in the empirical calculation. These differences mainly caused by lack of standard definition of land use, and some assumption in the calculation process such as one good correspond to one land types, which clearly neglect the indirect lind of human of utilization of goods. We also paid attention to the productivity difference in various lands use in different province. Productivity is influenced not only by human management factors such as technology, knowledge and culture, but also by natural geography conditions like soil, climate and resources availbility. Using data of the world average yield makes the results comparable, but it neglects the difference in biological productive. Using local yield data means the calculated area is real. Due to limited data, we use the world average yield in the empirical analysis.

For the sake of applying this method in China, some improvements and suggestions have been but forward in the last section of this paper. Above all, it is needed to build an integrate system of environmental and economic accounting, and improve some evaluation methods so that we can provide acceptable measures of economic value of ecological services and natural resources. At the same time, with a view to make ecological footprint model dynamic, environment value discount is also a problem which needed further research. As ecological footprints do not measure people's quality of life, the other imperative for

sustainability, they need to be complemented by social indicators to cover progress toward sustainability comprehensively.

Key words: ecological footprint; measuring sustainable development; ecological productive area; Zhangye prefecture

文章编号: 1000-0933(2001)09-1484-10 **中图分类号**: P967 **文献标识码**: A

可持续发展的定量评价方法研究是当前可持续发展研究的前沿和热点。20 世纪 90 年代以来, 国际上提出了一些直观的、较为易于操作的可持续发展指标体系及其定量评价和计算的方法及模式, 如世界银行的"国家财富"指标体系、Daly 和 Cobb (1989) 年提出的"可持续经济福利指数"(ISEW)、Cobb 等 (1995) 提出的"真实发展指标"(GPI)、Prescott-Allen (1995) 提出的"可持续性的晴雨表"(Barometer of Sustainability) 模型[1]。这些新的指标体系及其定量计算方法和模型已在一些国家和地区的可持续发展评价中得到了应用。至今已有很多研究结果表明, 发展的可持续性主要取决于自然资产[2~4]。但是由于很难定量测量生态目标, 这方面的研究进展一直较缓慢。

人类的生存依赖于自然, 该生态准则的涵义是明显的。人类社会必须生存于生态系统的承载力范围内。从生态经济学的角度而言, 就是人类社会要取得发展的强可持续性, 人类必须维持自己的自然资产存量。但地在 1987 年世界环境与发展委员会(WCED) 提出可持续发展的概念至今, 世界人口、贫困、消费日益增加, 生物多样性、森林面积日益减少, 人类生存在一个更加危险的世界中。这些证据表明, 人类正在远离可持续性。为了将可持续发展变成现实的可操作的目标, 人类必须知识自己目前所处的状态以及还有多远的路要走。因此需要一个可可操作的工具去测量人类的需求是否仍在自然资产能提供的范围内[5]。以前已有很多科学家在这方面做过尝试, 如 Vitousek 1986 年测算的人类利用自然系统的初级生产能力等。[6] 比较这些研究方法, 它们的研究目的都一样, 都是为了使生态状态可测量, 为了将强可持续性转化为具体的指标来测量人类是否生存于生态系统承载力的范围内。对于这类研究目标, 生态足迹方法是一种简单但综合的研究学尝试[7]。

1 生态足迹研究方法介绍

1.1 生态足迹概念和模型

由于任何人都要消费自然提供的产品和服务。均对地球生态系统构成影响。因此, 测量人类对自然生态服务的需求与自然所能提供的生态服务之间的差距具有重要的意义。只要人类对自然系统的压力处于地球生态系统的承载力范围内, 地球生态系统就是安全的、人类经济社会的发展就处于可持续的范围内。但如何判定人类是否生存于地球生态系统承载力的范围内呢? Ree 人 Wackernagel 等在 1992 年[1] 提出并在 1996 年由 Wackernagel 完善的生态足迹(Ecological footprint) 模型[8] 就是为了回答这个问题, 它通过测定现今人类为了维持自身生存而利用自然的量来评估人类对生态系统的影响。生态足迹的计算是基于以下两个基本事实: ①人类可以确定自身消费的绝大多数资源及其所产生的废弃物的数量; ②这些资源和废弃物流能转换成相应的生物生产面积(Biologically productive area)。因此, 任何已知人口(某个个人、一个城市或一个国家) 的生态足迹是生产这些人口所消费的所有资源和吸纳这些人口所产生的所有废弃物所需要的生物生产总面积(包括陆地和水域)。其计算公式如下[1]:

$$EF = N \cdot ef, \quad ef = \sum_{i=1}^{n} (aa_i) = \sum_{i=1}^{n} (c_i / p_i)$$

其中, i 为消费商品和投入的类型; p_i 为 i 种消费商品的平均生产能力; c_i 为 i 种商品的人均消费量; aa_i 为人均 i 种交易商品折算的生物生产面积; N 为人口数; ef 为人均生态足迹; EF 为总的生态足迹。生态足迹模型主要用来计算在一定的人口和经济规模条件下, 维持资源消费和废弃物吸收所必需的生物生产面积。由上式可知生态足迹是人口数和人均物质和能源消费的一个函数, 生态足迹是每种消费商品的生物生产面积的总和。生态足迹测量了人类的生存所需的真实生物生产面积。将其同国家和区域范围所能提供的生物生产面积进行比较, 就能为判断一个国家或区域的生产消费活动是否处于当地生态系统承载力范围内

提供定量的依据。

1.2　生态足迹模型中使用的生物生产型面积的类型

在生态足迹账户核算中, 生物生产土地面积主要考虑如下 6 种类型: 化石燃料土地、可耕地、林地、草场、建筑用地和水域[8, 9]。

(1) 化石燃料土地　人类所有的生态足迹反映了对自然的竞争性索取, CO_2 浓度的变化对人类的生存至关重要, 人类应该拿出一部分土地(化石燃料土地)吸收 CO_2。在这里值得注意的是, 将 CO_2 吸收所需要的生态空间同生物多样性保护和林地分开并非意味着重复计算。因为老年林同新生林在吸收 CO_2 的能力上存在较大差距, 而且在多样性上也存在区别。同时用于 CO_2 吸收的林地如用于木材的生产, 则在木材的加工过程中也会排放 CO_2。因此在处理化石燃料土地类型时将它与生物多样性的保护面积和林地面积分开来。另外化石原料的消费在排出 CO_2 的时候可能还会排放有毒污染物造成其它生态危害, 这些在目前的生态足迹计算中未能考虑。目前还没有证据表明那个国家专门拿出一部分土地用于 CO_2 的吸收, 出于生态经济研究的谨慎性考虑原则, 在生态足迹的需求方面, 考虑了 CO_2 吸收所需要的化石燃料的土地面积。

(2) 可耕地　从生态角度看是最有生产能力的土地面积类型, 在可耕地面积上生长阒人类利用的大部分生物量。根据联合国粮农组只(FAO)的调查, 目前世界上人类总共耕种了大约 13.5 亿 hm^2 的优质可耕地。而每年由于严重退化而放弃耕地有 1000 万 hm^2 左右。这意味着, 现今全人类人均不到 0.25hm^2 的优质耕地。

(3) 林地　林地包括人工林和天然林。森林除了提供木材以外还有涵养水源、稳定气候状态、维持大气水分循环、防止土壤流失等诸多功能。目前在地球上有 51 亿 hm^2 的林地, 人均 0.9hm^2 左右。其中有 17 亿 hm^2 的面积上林木的覆盖率不足 10%。由于人类对森林资源的过度开发, 全世界除了一些不能接近的热带丛林外, 现有林地的生物量生产能力大多较低。

(4) 草场　人类主要用草场来饲养育牲畜。相比较目前的 33.5 亿 hm^2 的草场(人均 0.55hm^2)的生产能力比耕地要低得多。草场积累生物量的能力比可耕地要低得多, 从植物转化为动物生物量使人类损失了大约 10% 的生物量。

(5) 建筑用地　根据联合国的统计, 目前人类定居和道路建设用地面积大约人均 0.06hm^2。由于人类定居在最肥沃的土壤上, 因此建筑面积的增加意味着生物生产量的明显降低。

(6) 水域　目前地球上的海洋面积在 366 亿 hm^2 左右, 人均超过 6hm^2。其中 8.3% (人均 0.5hm^2)提供了全海洋 95% 的生物产品。目前海洋的生物产量已接近最大。

1.3　生态足迹研究简介

W ackernagel 等[8, 9]应用生态足迹模型对世界上 52 个国家和地区 1993 年的生态足迹进行了实证计算研究, 结果表明, 要维持目前的消费水平, 每个普通加拿大人需要近 7hm^2 生物生产土地面积和 1hm^2 生物生产海域面积(合计人均生态足迹为 7.7hm^2), 而其人均生态承载力为 9.6hm^2, 尚有 1.9hm^2 的生态盈余; 相应地, 普通美国人的生态足迹要比这个数字大 30%, 为 10.3hm^2, 但其人均生态承载力为 6.7hm^2, 其人均生态赤字为 3.6hm^2; 普通意大利人的人均生态足迹为 4.2hm^2, 其人均生态承载力仅为 1.3hm^2, 人均生态赤字为 2.9hm^2; 普通瑞典人的生态足迹为 5.9hm^2, 其人均生态承载力供给为 7.0hm^2, 尚有 1.1hm^2 的生态盈余。需要指出的是, 据W ackernagel 等的计算, 中国 1993 年的人均生态足迹为 1.12hm^2, 而其人均生态承载力仅为 0.8hm^2, 人均生态赤字为 0.4hm^2。这些数据可能仍然低估了这些国家的人维持其现今的生活水平所实际需要的生物生产土地面积[5, 6]。生态足迹的赤字部分主要靠进口和枯竭自然资源获得。

就全球平均而言, 1993 年人均生态足迹为 2.8hm^2, 而人均生态承载力为 2.1hm^2, 人均生态赤字为 0.7hm^2, 所计算的 52 个国家和地区中的 35 个国家和地区存在生态赤字, 只有 12 个国家和地区的人均生态足迹低于全球人均生态承载力。这 52 个国家和地区的人类消费已超过了这些国家和地区生态承载力总和的 35%。按 1997 年世界上 58.9248 亿人口计算, 全球现有生物生产土地和海洋面积, 人均生态承载力仅为 2.3hm^2, 如果按世界环境与发展委员会(W CED)的报告《我们共同的未来》所建议的, 留出 12% 的生物生产土地面积以保护生物多样性即保护地球上的其他 3000 万个物种的话, 则实际人均生态承载力减少到

$2hm^2$, 则人均生态赤字增加为 $0.8hm^2$。因此人均 $2hm^2$ 的生物生产面积就是 1997 年全球人均生态承载力底线(Bottom-line)或生态阈值(Ecological benchmark)[11]。从全球范围而言, 人类的生态足迹已超过了全球生态承载力的 30%, 也就是说, 人类现今的消费已超出了自然的再生产能力, 即在耗尽全部的自然资产存量。

2 张掖地区 1995 年生态足迹的计算和分析

张掖地区 1995 年的生态足迹计算主要由 4 部分组成: ①生物资源的消费(主要是农产品和木材)(表 1 和表 2); ②能源的消费(表 3); ③水资源的消费(表 4); ④贸易调整调整部分(表 5); 由于贸易的影响, 各种生物资源和能源的净消费的足迹构成了整个地区的生态足迹。

表 1 张掖地区生态足迹计算生物资源账户

Table 1 The ecological footprint's ledger of the biotic resources in Zhangye prefecture

分类 Categories	全球平均产量[9] Yield (global average) (kg/hm^2)	生物量 Biological product (t)	毛足迹 Gross footprint (hm^2)	人均足迹 Footprint per cap (hm^2/per cap)	生产型面积类型 Biological productive area
· 谷物 Cereals					
·· 小麦 Wheat	2744	423786.70	154441.21	0.128948	耕地面积①
·· 蚕豆 Broad bean	852	8971.20	10529.58	0.008791	耕地面积
·· 水稻 Rice	2744	9258.60	3374.13	0.002817	耕地面积
·· 谷子 Millet	2415	2427.90	1005.34	0.000839	耕地面积
·· 糜子 Broom broad millet	2415	1576.90	652.96	0.000545	耕地面积
·· 玉米 Maize	2744	279956.00	102024.78	0.085184	耕地面积
·· 洋芋 Potato	12607	18927.60	1501.36	0.001254	耕地面积
·· 大豆 Soya	1856	7260.20	3911.75	0.003266	耕地面积
·· 高粱 Chinese sorghum	3200	432.50	135.15	0.000113	耕地面积
·· 其它 Other	3800	4668.30	1228.50	0.001026	耕地面积
· 蔬菜和瓜类 Vegetable and melon					
·· 蔬菜 Vegetable	18000	39257.25	2180.96	0.001821	耕地面积
·· 瓜类 Melon	1800	3636.53	202.03	0.000169	耕地面积
· 其它作物 Other plant					
·· 棉花 Cotton	1000	1034.00	1034.00	0.000863	耕地面积
·· 油料 Oil	1856	51478.60	27736.31	0.023158	耕地面积
··· 油菜籽 Rapeseed	1856	39486.10	21274.84	0.017763	耕地面积
··· 胡麻籽 Flaxseed	1856	11834.20	6376.19	0.005324	耕地面积
·· 葵花籽 Sunflower seeds	14261	2662.10	186.67	0.000156	耕地面积
·· 甜菜 Beet	18000	231314.50	12850.81	0.010730	耕地面积
·· 辣椒干 Chili power	945	755.80	799.79	0.000668	耕地面积
· 水果 Fruit	18000	71294.30	4010.79	0.003349	林地面积②
· 动物产品 Animal product					
·· 猪肉 Prok	33	42133.14	1276761.82	1.066.11	牧草地③
·· 牛肉 Beef	33	4176.02	126546.06	0.105658	牧草地
·· 羊肉 Mutton	33	6374.08	193153.94	0.161271	牧草地
·· 皮毛 Fur					
··· 山羊毛 Goat fur	15	82.53	5502.00	0.004594	牧草地
··· 绵羊毛 Sheep fur	15	3397.44	226496.00	0.189109	牧草地
··· 山羊绒 Goat cashmere	15	32.57	2171.33	0.001813	牧草地
··· 骆驼毛 Camel hair	15	34.91	2327.33	0.001943	牧草地
··· 鲜鸡蛋 Egg	400	11015.23	27538.08	0.22992	牧草地
··· 牛奶 Milk	502	7226.12	14394.66	0.012019	牧草地

①Arable land; ②Forestry; ③Pasture

表 1 中生物资源的消费分为谷物、蔬菜和瓜类、其它作物、水果、动物产品四大类, 各大类下层还有细分类。分类的递阶结构以(.)的多少表示, (.)表示最上层, (..)表示所在(.)的下层, 据此类推。由于表 1 中的消耗值不是净消耗, 故计算结果仅为一种毛足迹。在计算中使用 1993 年世界生物生产面积的平均水平作为标准[8]。采用这一公共标准主要是为了使计算结果可以进行国与国、地区与地区之间的比较。具体计算使用联合国粮农组织计算的关于生物生产面积的平均的生物产量资料, 将张掖地区 1995 年的消费转化

为提供这 消费需要的生物生产面积。生物资源消费采用的计算方法如下[10]:

$$EF_i = \frac{P_i}{Y_{\text{average}}}$$

其中, EF_i 为 i 种资源的消费的足迹; P_i 为 i 种生物资源的总生产量; Y_{average}为世界上 i 种生物资源的平均产量。

表 2　木材消费足迹账户

Table 2　The ecological footprint's ledger of wood consumption

分类 Categories	全球平均产量[9] Yield (global average) (m^3/hm^2)	消耗量 Consumption (m^3)	人均足迹 Footprint per cap (hm^2/per cap)	生产型面积类型 Biological productive area
原木直接消费 Direct roundwood consumption	1.0	952	0.0003994	林地 Forestry
锯材 Sawnwood	1.5	270	0.0001699	林地 Forestry

表 3　生态足迹的能源部分账户

Table 3　The ecological footprint's ledger of energy consumption

分类 Categories	全球平均能源足迹[9]① (GJ/hm^2)	折算系数[10] Conversion coefficient (GJ/t)	消费量 Consumption quantity (t)	消费量 Consumption quantity (GJ)	人均足迹 Footprint per cap (hm^2/per cap)	生产型面积类型 Biological productive area
煤 Coal	55	20.90	410644	7.1658	0.13029	化石燃料土地②
焦炭 Coke	55	28.40	18886	0.4478	0.00814	化石燃料土地
燃料油 Fuel oil	71	50.20	601	0.0252	0.00035	化石燃料土地
原油 Crude oil	93	41.87	1972	0.0689	0.00074	化石燃料土地
汽油 Gasoline	93	43.12	3214	0.1157	0.00124	化石燃料土地
柴油 Diesel oil	93	42.71	1260	0.0449	0.00048	化石燃料土地
电力 Hydro-electric energy	1000	3.60	28055*	57626.9300	0.00087	建筑用地③

①Specific energy footprint global average in (GJ/(hm^2·a)), ②Fossil land area, ③Built-up area. * 单位千千瓦时, 在计算时按能源转化系数[10]折算为 GJ. * units is 10^3 KWH, it has been converted to GJ by energy conversion coefficient

表 3 中的能源平衡账户部分根据资料处理了如下几种资源: 煤、焦炭、燃料油、原油、汽油、柴油和电力。计算足迹时将能源的消费转化为化石能源生产土地面积。采用世界上单位化石燃料生产土地面积的平均发热量为标准[9], 将当地能源消费所消耗的热量折算成一定的化石燃料型生产面积。

表 4　生态足迹的水资源消费

Table 4　The ecological footprint's ledger of water resources consumption

分类 Categories	西北干旱区单位面积水资源量① (m^3/hm^2)	水资源消耗量[13] Water resources consumption (10^8m^3)	人均水资源足迹需求 Water footprint demand (hm^2/cap)	水资源供给量 The supply of water resources (10^8m^3)	水资源足迹供给 The supply of water resources footprint (hm^2)	生物生产型面积类型 Biological productive area
水资源 Water resources	123.5	13.06	8.829	12.45	8.417	水域

①Water resources quantity pre hectare in arid area of northwestern of China

由于目前关于水资源消费的账目不清楚, 这里只是一种粗略的估算。表 4 中水资源消费足迹的计算是以采用西北干旱区单位面积的水资源量为标准, 其中西北干旱地区的面积采用中国国土面积的 1/4[12], 可利用量水资源量取西北干旱地区完成地表水和地下水资源联合长发利用阶段完成后的可利用水资源量为

296.4×10⁸m³。①水资源供一量取张掖地区完成在 2004 年向下游额济纳旗分水 9.5×10⁸m³ 后,且完成地表水和地下水联合开发利用后的极限水资源可利用量。[13]

表 5 生态足迹的贸易调整部分

Table 5 The ecological footprint's ledger of trade balance

分类 Categories	净出口额 Net export value(10^4 RMB)	比例 Proportion (%)	能源密度 Energy intensity(GJ/t)	出口价值 Export value(10^4 $)	出口数量 Export quantity(t)	人均足迹调整比例 EF/cap adjusted proportion
粮油食品 Food, oil	887.0566	14.77		104.3596		0.007315*
土畜产品 Speciality and livestock products	976.5430	16.26		114.8874		0.008053*
医药类 Medicament	1299.0540	21.63	20.0	152.8299	58.0581	0.000018
化工类 Chemical products	551.9330	9.19	40.0	64.9333	85.7527	0.000052
五金矿产类 Hardware products	1861.7980	31.00	1.5	219.0351	58108.2182	0.001323
其它 Other	426.4118	7.10	10.0	50.1661	32.5240	0.000005

* 部分调整的生物生产型面积类型是耕地面积类型,其余部分调整的是化石原料土地类型 * Denote that adjusted biological productive area is arable area, the other is fossil land area

由于贸易的影响,一个国家或地区的生态足迹可以跨越地区界限,计算一个国家或地区的生态足迹应该计算净消费额。调整部分主要是考虑贸易对农产品和能源消费的影响而对当前的消费额进行调整。由于张掖地区商品的进出口类型缺乏明细账,只有总分类账,在计算净消费额时采用了简化处理的方法,将贸易中分类产品按价值比例换算成相应的生物生产面积比例,然后从该类型的生物生产面积中按比例进行扣减。如张掖地区 1995 年粮油食品的净出口总额为 887 万元,该年农业商品的产值为 121 258 万元②,粮油食品的净出口占农业商品产值的比例为 0.007 315。在计算农产品消费的足迹时从农产品总生产量的足迹(耕地面积)中扣除 0.007 315 部分以使计算结果更接近实际。由于专门建立了能源消费账户,各种资源利用过程中(加工过程、运输过程)所消耗的能源不单独处理。能源消费部分贸易调整采用的计算方法如下[9]:

$$N_i = M_i \times \left(\frac{H_i}{G_i}\right) \times W_i$$

式中,W_i 为 i 种商品贸易的净价值量;H_i、G_i 为中国该类商品的净贸易的实物量和价值量;M_i 为该类商品的能源密度[9,11];N_i 为 i 种商品的能源携带量。如计算公式所示,能源的贸易调整首先需将贸易商品的比值量转化为实物量,张掖地区的转化计算参考全国该类商品贸易的实物量和价值量的比例得到。采用实物量乘上该类型的能源密度,能得到该类贸易商品的能源携带量。最后将能源消耗量除以化石燃料土地单位面积的能源的产量就得到贸易中能源所携带的足迹,生物资源消费和能源部分贸易调整的结果见表 5。

各种生物资源和能源的净消费的足迹就构成了整个地区的足迹需求。

表 6 是生态足迹的总结部分,由生态足迹的需求和能供给的生物生产土地面积两部分组成。由于耕地、化石燃料土地、牧草地、林地等单位面积的生物生产能力差异很大,为了使计算结果转化为一个可比较的标准(依据相互之间生物量产量的差异),有必要在每种生物生产面积前乘上一个均衡因子,以转化为生物生产面积。均衡因子的选取来自中国生态足迹的报告[9]。在供给方由于各国或地区的各种生物生产面积的产出差异很大,在转化成生物生产面积时分别乘了一个产出因子[9]。如张掖地区耕地面积的产出因子取

① 曲耀光,西北干旱区水资源合理开发利用的某些问题(见:刘长缨主编,西部资源环境科学研究中心年报(1994~1996 年),115).

② 张掖地区行政公署统计处编,张掖地区统计年鉴(1995).

为 1. 92, 表明张掖地区耕地的生物产出率是世界平均水平的 1. 92 倍。同时出于谨慎性考虑, 在张掖地区能供给的生物生产面积计算时扣除了 12% 的生物多样性保护的面积。

表 6　张掖地区 1995 年生态足迹计算的总结

Table 6　The ecological footprint's summary of Zhangye prefecture in 1995

生态足迹的需求 The demand of footprint				能供给的生态足迹 The supply of footprint			
类型 Categories	总面积 Total area (hm^2/cap)	均衡因子 Equivalence factor	均衡面积 Adjusted equivalent total area (hm^2/cap)	类型 Categories	总面积 Total area (hm^2/cap)	产出因子 Yield factor	均衡面积 Adjusted equivalence area (hm^2/cap)
化石能源 Fossil energy	0. 140	1. 1	0. 154	CO_2 的吸收 CO_2 absorption	0. 00		0. 00
建筑用地 Built area	0. 001	2. 8	0. 003	建筑面积 Built-up area	0. 04	1. 66	0. 0664
耕地面积 Arable land	0. 270	2. 8	0. 756	耕地面积 Arable land	0. 23	1. 92	0. 4416
牧草地 Pasture	1. 553	0. 5	0. 777	牧草地 Pasture	1. 71	0. 39	0. 6669
林地 Forest	0. 004	1. 1	0. 0044	林地 Forest	0. 30	0. 91	0. 273
总面积 Total used area	1. 991		1. 685	总面积 Total existing area	2. 36		1. 522
				减 12% 的生物多样性保护面积 Minus 12% for biodiversity			0. 183
				总的可利用面积 Total available area			1. 339

由以上计算可得, 1995 年张掖地区的人均生态足迹需求为 1. 685 hm^2, 而实际可供给面积为 1. 339hm^2, 因此, 人均生态足迹赤字为 0. 346hm^2。张掖地区的生物资源的产量比全球平均水平低, 采用全球平均产量数据将导致足迹需求计算结果偏小。因资料的原因, 不能确定水资源的均衡因子和产出因子的大小, 故在表 7 的生态足迹的总结表中未包括水资源消费的计算, 如将水资源的均衡因子和产出因子均取 1, 则足迹示字增加 0. 362hm^2。显然上述实证分析结果是一种较乐观的估计, 张掖地区的人均生态足迹赤字比 0. 346hm^2 要大得多。生态赤字的存在表明人类对自然的影响超出了其生态承载能力的范围。从张掖地区 1995 年生态足迹的计算过程来看, 由于进出口贸易量不大, 因而进出口贸易对足迹的影响并不大, 因此只能是通过消耗自然资本存量来弥补生态承载力的不足, 因此, 可认为张掖 1995 年的发展处于一种不可持续的状态。

张掖地区生态足迹赤字的存在主要因为对自然资源的过度利用造成, 可以在不降低人们生活水平的前提下, 减少生态足迹的需求。通常有如下 3 种方法: ①采用高新技术, 提高自然资源单位面积的生产产量; ②高效利用现有资源存量; ③改变人们的生产和生活消费方式, 建立资源节约型的社会生产和消费体系[8]。

3　结语

由上述对生态足迹的概念以及计算模型的介绍, 以及对张掖地区 1995 年生态足迹的实证计算和分析可以看到, 生态足迹的概念模型通过引入生物生产面积的概念为自然资产核算提供了一种简单框架[14], 提供了测量和比较人类经济系统对自然生态系统服务的需求和自然生态系统的承载力之间差距的生物物理测量方法[8]。

生态足迹模型紧扣可持续发展理论, 是涉及系统性、公平性和发展的一个综合指标; 将生态足迹的计算结果与自然资产提供生态服务的能力进行比较能反映在一定的社会发展阶段和一定的技术条件下, 人

们的社会经济活动与当时生态承载能力之间的差距。测算指标采用生物生产面积,不是使用金钱的测量使人容易理解[15],而且容易进行尝试性测算。但是该模型由于提出时间比较短,还存在许多需要完善的地方,该模型的计算结果只反映经济决策对环境的影响,而忽略了土地利用中其它的重要影响因素,如工业城市化的推进挤占耕地,由于污染、侵蚀等造成的土地退化情况。更重要的是该模型仅注意了经济产品和社会服务能的直接消费,未考虑经济资源之间的间接消费,而且也未考虑生态产品和生态服务能的消费。同时生态足迹账户模型并没有设计成一个预测模型,它只是一种关于现实情况的衡量,因此在实证分析过程中,不能反映技术进步,人类活动方式等条件的变化。

同时在具体计算生态承载力时,各种生物生产土地面积的统计数据相当重要。由于在各土地类型的核算中缺乏一些标准的定义容易导致计算结果的偏差较大[6],如计算过程中将产出率极低的荒漠草原与产出率较高的湿地草原相提并论并简单相加,导致计算结果偏大。这些差异的来源主要是因为缺乏对用地类型的定义标准,同时计算过程中消费商品对应单一土地利用类型的假设,没有考虑人类对消费商品的间接利用。

当前张掖地区的足迹计算是基于人均国民消费和世界平均土地产出量。这是一个促进国与地区比较的实用方法。但是土地生产率受人类的管理模式和自然条件影响较大,以全球平均的生产率数据为基础计算生态足迹忽略了各地区之间真正的生态比较优势,计算的生态足迹结果不能反映各地区真实的生态生产型面积需求的大小。因此,使用当地的生产能力意味着计算的面积是当地消费所需要的真实的土地面积。对国家的政府来说,基于当地生产能力的土地利用可能与自身利益关系更密切一些,将足迹的计算程序建立在当地的消费,生产和统计的基础上,可以揭示各自消费,生产和管理模式的变化对足迹大小的影响,增加净消费额调整的准确度,同时有助于减少足迹计算中数据方面的一些误差,从而更好的为政府决策服务。

为更好的改进生态足迹的计算方法,提出如下建议:

(1)建立反映环境信息的资源环境整合账户体系[16]。西北地区的生态环境问题不仅是一个如何利用资源的问题,同时还应考虑自然灾害(如沙漠化等)侵蚀耕地等威胁人类的生存环境的一些关键问题。建立资源环境整合账户的目的就是将这些问题纳入到一个可核算的框架下,为生态过程和经济过程的耦合提供可解析桥梁。

(2)完善环境价值的估算方法和理论。由于目前的生态足迹研究方法仅处理资源类经济产品和社会服务能的消费[17],因此完善环境价值的估算方法和理论能在生态足迹方法革新中为定量反映生态产品和生态服务能的耗费做出贡献。

(3)研究未来资源和环境价值的折旧问题。由于生态足迹模型目前仅是一个静态模型,回避了可持续发展的代际公平性问题,未来价值的折旧是处理代际公平性问题中的难点,因此需要加强该方面的研究,来解决生态足迹模型的预测性问题。只有将生态足迹模型进一步改进成预测模型,才能在新的框架下考虑技术进步、人类活动方式和市场情况等因素变化的影响。

(4)在当前应用的生态足迹计算方法中,还没有考虑到人类的生活质量等问题。而这些问题又是可持续性评判中特别重要的方面,在今后的研究中,需要考虑如何将生态足迹的指标同一些反映社会发展的指标结合起来(如 GDP),以便更综合的反映人类社会发展的可持续性状况。

参考文献

[1] Hardi P, Barg S, Hodge T, *et al*. Measuring sustainable development: Review of current practics. Occasional paper number 17. November 1997 (IISD). 1~2, 49~51.

[2] Costanza R, Daly H. Natural Capital and sustainable development. *Conservation Biology*, 1992, **6**(1): 37~38.

[3] Macdonald D, Hanley N, Moffatt I. Applying the concept of natural criticality to regional resource management. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 73~76.

[4] Costanza R, cumberland J, Daly H, *et al*. An introduction to Ecological Economics. St Lucie Press, 1997.

[5] Herendeen R A. Should sustainability analyses include biophysical assessments. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 17～18.

[6] Vitousek P, Ehrlich P, matson P. Human Appropriation of the Products of Photosynthesis. *Bioscience*, 1986, **36**: 368～373.

[7] 徐中民, 张志强, 程国栋. 可持续发展定量研究的几种新方法评介. 中国人口资源与环境, 2000, **10**(2): 60～64.

[8] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al*. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 375～390.

[9] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al*. Ecological Footprints of Nations. Commissioned by the Earth Council for the rio+ 5 Forum. International Council for Local Environmental Initiatives, *Toronto*. 1997. 4～12.

[10] 邱大雄主编. 能源规划与系统分析. 北京: 清华大学出版社, 1995. 48.

[11] Costanza R, Neil C. Energy intensities, interdependence, and value in ecological systems: A linear Programming approach. *J of Theor Bio*., 1984, **106**: 41～43.

[12] 刘昌明, 何希吾著. 中国 21 世纪水问题方略. 北京: 科学出版社, 1998. 150.

[13] 曲耀光, 樊胜岳. 黑河流域水资源承载力分析计算与对策. 中国沙漠, 2000, **20**(1): 3.

[14] Wackernagel M. an evalvuation of the ecological footprint. *Ecological economics*, 1999, **31**: 317～318.

[15] Rees W E, Wackernagel M. Monetary analysis: turning a blind eye on sustainability. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 47～52.

[16] Macdonald D V, Hanley N, Moffatt I Applying the concept of nature capital criticality to regional resources management. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 73～87.

[17] Bartelmus P. Green accounting for a sustainable economy policy use and analysis of environmental accounts in the Philippines. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 155～170.