

生态足迹模型在山区生态可持续评价中的初步应用 ——以 1999 年北京西部山区为例

李 红¹, 张凤荣², 孙丹峰², 周连第¹

(1. 北京市农林科学院农业综合发展研究所, 北京 100089; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘 要: 在剖析生态足迹分析法的理论基础上, 进一步考虑不同消费水平对生态足迹时空变异的影响, 划分农村居民和城镇居民两类不同的消费群体, 分别计算各自的生态足迹, 其次进一步细化模型中人均水资源足迹, 从而构建生态足迹与生态容量平衡模型。根据平衡模型计算出生态盈亏, 得出区域生态持续性评价结果。并以 1999 年北京西部山区门头沟区为例, 进行模型计算和生态可持续评价, 结果表明 1999 年门头沟区处于生态赤字状态, 说明该区生态系统处于不可持续状态。在对门头沟区的初步研究基础上, 指出生态足迹作为山区生态可持续评价指标的优点及当前存在的缺点。

关键词: 北京西部山区; 生态足迹; 生态容量; 生态赤字; 生态可持续评价

中图分类号: X17

文献标识码: A

当前自然科学家和社会科学家逐渐达成共识, 那就是可持续发展依赖于自然资本的维持^[1]。生态足迹 (Ecological Footprint) 是由著名生态经济学家 Ree 教授等在 1992 年提出, 并在 1996 年 Wackernagel 教授进一步发展为计算和衡量人类对自然资源利用程度以及自然界为人类提供服务功能大小的一种新方法^[2-4]。该方法提出以来在世界各国引起强烈的反响, 并在短时间内就不同的地域空间尺度、不同的社会领域进行了模型的运用和实践。

目前已有的研究主要从以下三个空间尺度开展: 全球尺度, Wackernagel 等率先应用该方法对全球人类的生态足迹及可利用的生态空间进行计算^[3]; 国家尺度, 最早也是 Wackernagel 计算了 52 个国家和地区的生态足迹^[4,5]; 在区域和城市尺度上, Wackernagel 等则利用改进后的算法对丹麦及其亚区进行了生态足迹的计算^[6]。生态足迹概念在 1999 年引进国内, 区域生态足迹研究的实践成果最早见于 2000 年, 并且较多地集中在对我国西

部和台湾省的地区级尺度的研究^[7,8]。本文在生态足迹模型基础上建立山区生态可持续评价方法, 并以北京西部山区为例探讨生态足迹方法在山区这一特殊层次上的应用效果及实践意义。

1 生态足迹的理论依据及计算方法

生态足迹是指能够持续地提供资源和消纳废物的, 具有生物生产能力的地域空间, 它从具体的生物物理量角度来研究自然资本消费的空间^[3-5]。可见, 生态生产空间 (ecologically productive area) 是指具有生态生产能力的土地或水体。这一转化极大地简化了对自然资本的统计, 并且各类土地之间建立等价关系要比各种繁杂的自然资本项目之间更容易, 从而更有利于计算自然资本的总量。在生态足迹计算生物生产土地主要考虑如下 6 种类型: 化石燃料土地、可耕地、林地、草场、建筑用地和水域。这些不同类型的消费用地通过采用替代因子法折算后相加就得到总生态足迹的需求。

收稿日期 (Received date): 2005-12-11; 改回日期 (Accepted): 2005-04-50.

基金项目 (Foundation item): 北京市自然科学基金 (4022005), 北京市科委重点项目 (95541000), 北京市财政局重点项目。[Supported by Beijing Science Fund (4022005, 6012006); Key Project of Science and Technology in Beijing (95541000); Key Project of Beijing Finance Bureau]

作者简介 (Biography): 李红 (1973-), 女, 山东人, 助研, 主要从事信息技术在山区资源的应用, 联系电话: 51503312, E-mail: lihsdf@sohu.com [Li hong (1973-) female, assistant researcher, Han nationality, major in applying information technology to mountain natural resources sustainable use.]

1.1 生态足迹的理论依据

生态足迹的计算基于以下几个基本的事实: (1) 人类可以跟踪自身所消耗的绝大多数资源及所产生的废弃物数量; (2) 这些资源和废弃物流的大部分都能转换成相应的生物生产空间 (biologically productive area); (3) 通过构建不同生产用地类型的权衡因子可将不同的生产用地类型面积转化为标准面积——全球面积, 进而避免不同生态用地类型间的不可计算性; (4) 代表不同生产用途的全球面积之和表示研究区域人类的全部需要。可见生态足迹模型是从需求方面计算人类发展所需的生态空间, 将其与地球生态系统可供给方面计算生态承载力 (biological capacity), 比较两者可评价研究对象的生态可持续发展状况和空间, 若生态承载力大于生态足迹, 则处于持续状态; 若两者相等, 则处于平衡状态; 若小于生态足迹, 则处于不可持续状态。

1.2 生态足迹的计算方法

第一步, 计算各主要消费项目的人均年消费量。划分消费项目, 利用当年人口计算第 i 项的人均年消费量值 (C_i)。

第二步, 计算生态足迹的各项组分 (A_i)。其计算公式如下

$$A_i = C_i / P_i$$

其中 A_i 为 i 项消费项目人均占用的实际生态生产性土地面积为; P_i 为 i 项消费项目的年平均生产力。

第三步, 计算人均生态足迹 (EF)

$$EF = \sum \gamma_i A_i$$

式中 EF 为研究区域人均生态足迹; A_i 为生态足迹的 i 项组分; γ_i 为均衡因子, 均衡因子就是一个使不同类型生态生产性土地转化为在生态生产力上等价的系数。

第四步, 计算人均生态容量 (EC)

$$EC = \sum B_i \gamma_i \alpha_i$$

式中 B_i 为研究区域人均 i 类生态生产性土地的面积; α_i 为生产力系数, 它是一个国家或地区某类土地的平均生产力与世界同类平均生产力的比率; γ_i 为均衡因子。

第五步, 计算生态盈余 (或赤字)。

通过比较人均生态足迹和生态容量, 可确定研究对象的生态盈余 (或赤字)。

1.3 生态足迹模型的修正

可持续分析时简单采用人均生态足迹将难以解释其分布空间变异, 因此进一步根据消费水平差异将消费群体简单划分为农村居民和城镇居民两类消费类型, 采用加权平均得到全区的人均生态足迹, 进而通过消费类型分析可解释不同时空变异的人口原因, 其次水资源日益紧缺, 水的生态用地日益重要, 因此引进了水的生态足迹计算非常迫切。

2 门头沟区生态足迹模型计算结果

2.1 门头沟区基本情况

门头沟区位于北京市西部 ($115^{\circ}25' \sim 116^{\circ}10' E$, $39^{\circ}48' \sim 40^{\circ}10' N$), 总面积 1455 km^2 , 其中山区面积约占 98.5% , 是北京西山的中心组成部分, 是首都的重要生态屏障和水源涵养地。因而门头沟区的生态可持续发展对整个北京市的可持续发展就至关重要, 所以尝试利用生态足迹分析法来量化评价门头沟区生态可持续发展状况及其生态盈余 (或赤字), 对当地生态环境的建设和保护具有现实的指导意义。

农村居民人均生态足迹的计算采用自下而上的方法, 对全部不同收入层次共 120 户农户进行问卷调查, 并根据 1.3 中相关模型计算得到农村居民人均生态足迹 (表 1), 而对城镇居民则采用自上而下的方法计算其生态足迹 (表 3)。在城镇居民人口数和农村居民人口数基础上, 采用加权平均即可得到全区的人均生态足迹 (表 4)。山区作为北京市清洁的淡水“水塔”, 其水资源消费在其可持续发展占有重要的地位, 由于缺乏农村居民的水分消费数据, 因而只能对城镇居民的水分消费及污水排放进行估算。表 2 中以北京市 1999 年单位面积的水资源量和单位面积污水排放量为标准, 这两个数据根据北京市 1999 年水资源公报中全市可利用水资源量以及全市污水排放量和全市面积计算而得。此外门头沟区作为一个山区县, 它的进出口贸易几乎接近于零, 而在国内各区域间的贸易往来已经平均在人均各项消费品中, 因而无需进行相关的贸易调整。

生态足迹是一个人口、人均物质和能源消费水平的函数, 它是研究区域每人消费的每种消费商品的生物生产面积的总和, 反映一定人口在一定的消费水平下生存所需要的真实生物生产面积。由于农村居民人均消费水平明显低于城镇居民, 所以导致

他们的人均生态足迹有较大的差异。由于农村居民人均粮食消费远大于城镇居民，所以比较表 1 和表 3 可知除了耕地外，城镇其余各类型面积均大于乡

表 1 1999 年门头沟区农村居民人均生态足迹

Table 1 EF of county residents of Mentougou district in 1999

生物生产空间类型	人均面积 (hm ² /人)	均衡因子	均衡面积 (hm ² /人)
耕地	0.085 3	2.8	0.238 7
草地	0.233 2	0.5	0.116 6
林地	0.012 5	1.1	0.013 8
水域	0.078 3	0.2	0.015 7
化石燃料土地	0.100 2	1.1	0.110 2
建筑用地	0.002 9	2.8	0.008 3
合计			0.503 3

注：计算资料来自于门头沟区社会经济统计资料(1999)，表中的均衡因子是以 Wackemagel 和 Rees 提出的生态足迹计算方法为理论依据，采用联合国粮农组织有关生物资源 1993 年的世界平均产量资料计算得到的。

表 2 1999 年门头沟区城镇居民人均水资源足迹

Table 2 Water resource EF of city residents of Mentougou district in 1999

项目	总量 (×10 ⁴ m ³)	人均消费 (排放量) (m ³)	市平均用水量 (m ³ /hm ²)	人均水资源足迹 (hm ² /人)	生物生产空间类型
全年用水量	1 085.75	0.007 2	846.025 7	0.008 5	水域
全年城市污水排放量	1 843.25	0.012 1	807.353 6	0.015 1	水域

表 3 1999 年门头沟区城镇居民人均生态足迹

Table 3 EF of city residents of Mentougou district in 1999

生物生产空间类型	人均面积 (hm ² /人)	均衡因子	均衡面积 (hm ² /人)
耕地	0.045 9	2.8	0.128 6
草地	1.133 8	0.5	0.566 9
林地	0.018 7	1.1	0.020 5
水域	0.236 3	0.2	0.047 3
化石燃料土地	0.230 1	1.1	0.253 1
建筑用地	0.007 5	2.8	0.021 0
合计			1.037 4

表 4 1999 年门头沟区人均生态足迹

Table 4 EF of Mentougou residents in 1999

生物生产空间类型	人均面积 (hm ² /人)	均衡因子	人均生态足迹 (hm ² /cap)
耕地	0.059 863	2.8	0.167 6
草地	0.814 819	0.5	0.407 4
林地	0.016 479	1.1	0.018 1
水域	0.180 341	0.2	0.036 1
化石燃料土地	0.184 087	1.1	0.202 5
建筑用地	0.005 89	2.8	0.016 5
合计			0.848 2

镇，其中草地间差别最大，主要由于城镇居民人均肉蛋奶消费量明显高于农村居民；另一方面因农村

城镇居民的水资源消费和生活污水排放数据暂时无法得到，城镇居民在水资源生态足迹也就明显大于农村居民。可见门头沟生态足迹大小主要取决于城市居民的生态足迹，而且随城镇化发展，将进一步扩大其生态足迹。

2.2 生态容量的计算结果

在计算生态容量时首先要得到研究区域的各种生态生产性土地的面积，通常情况下根据研究区域的土地利用现状调查资料，但是由于研究区域很难做到每年更新土地利用现状资料，这就为区域生态容量的计算带来一定的难度。而遥感技术可提供近实时的土地利用和土地覆被等各类生态生产性土地类型分布，因此采用了 1999 年 TM 遥感数据与地学辅助数据支持下的似然决策专家分类结果，与地面抽样精度检验，各地类的平均精度都在 0.85 以上。根据此分类结果，计算出门头沟区生态容量见表 5。

表 5 1999 年门头沟区人均生态容量

Table 5 Ecological Capacity of Mentougou district in 1999

土地类型	面积 (hm ²)	人均面积 (hm ² /人)	均衡因子	产量因子	人均生态容量 (hm ² /人)
耕地	14 403.7	0.061 3	2.8	1.66	0.284 7
草地	87 713.51	0.373 0	0.5	0.19	0.035 4
林地	28 361.4	0.120 6	1.1	0.8	0.120 7
水域	2 302.058	0.009 8	0.2	1	0.002 0
建筑用地	3 037.736	0.012 9	2.8	1.66	0.060 1
幼林	6 781.13	0.028 8			
裸岩	2 900.459	0.012 3			
合计					0.502 9
扣除生物多样性保护 (12%) 人均生态容量					0.4425

比较表 3 和表 4，门头沟区 1999 年处于生态赤字状况，其生态赤字为 0.405 7 hm²/人。具体分析其原因有：(1) 门头沟区的石质山区面积很大，占全区总面积的 98.5%。建国以后特别是 1990 年代以后，各届政府对荒山绿化造林都很重视，尽管目前植被覆盖度明显提高 (74%)，但是由于自然条件的恶劣，仍有 2 900.459 hm² 裸岩，这就严重降低了生态容量，因而仍需通过各项技术措施加强对石质山区的绿化。(2) 通过近几年各项水利工程及小流域综合治理来调节水量，但仍不能满足当前工农业和生活用水的需要。为了提高现有的生态容量，需要综合治理当前门头沟的小流域，通过适当的水利工程措施提高蓄水量。(3) 门头沟区的山坡旱地面积较大，其林地和草地的生物生产量较低，所以其林地和草地处于赤字状态。因此要结合当前

退耕还林还草政策, 因地制宜地选择适合北京西部山区自然条件的树种和草种, 加强对草场管理和中幼林的抚育工作。(4) 由于土层薄, 坡度大, 门头沟区的耕地质量相对较差, 因而门头沟区一直是缺粮区, 每年都需要从外地购入粮食。其耕地的生物生产性面积低于需求的部分则通过从外地调入粮食来弥补。今后该区仍需合理安排农业用地结构, 通过不断扩大对农业的各方面投入, 进一步提高耕地的产出率, 降低生态赤字。(5) 门头沟区的幼林固碳, 森林、草地涵养水源、吸收有害气体、降尘和保育土壤等生态服务功能目前也缺乏合相关数据进行计算, 因而也一定程度上使计算的门头沟区生态容量偏低。这就需要加强对生态服务功能量化研究工作, 进一步完善生态足迹的计算模型。

3 结论

3.1 生态足迹评价的优点

根据生态足迹的概念和其计算模型可知, 生态足迹分析方法首先通过引入生态生产性土地概念实现了对各种自然资源的统一描述, 其次通过引入均衡因子和产量因子进一步实现了各国各地区各类生态生产性土地的可加性和可比性。此外生态足迹分析法提供一个相对直观数据来比较人类的需求和自然界的供给, 评估的结果清楚地表明在所分析的每一个时空尺度上, 人类对生物圈所施加的压力及其量级; 另外生态足迹的计算具有很强的可移植性, 这都使生态足迹作为山区生态可持续评价指标的可能。通过在门头沟区 1999 年生态足迹的实证计算和分析可以看到, 生态足迹分析方法提供一个相对直观数据来比较人类的需求和自然界的供给; 特别是对模型中的水资源生态足迹, 对山区这一特殊的地区更具有现实意义。通过平衡模型具体分析各生物生产空间类型的盈亏状态, 可以针对区域具体情况, 找出生态盈亏的原因, 从而更好指导当地生态环境建设和管护, 实现可持续发展。因此生态足迹法是分析为区域生态可持续评价提供一个较好的指标。

3.2 生态足迹评价的缺点

(1) 生态足迹分析法强调人类发展对环境系统的影响及其可持续性, 而不关心经济、社会、技术方面的可持续性, 并不考虑人类对现有消费模式的满意程度。因此, 尽管生态足迹分析法在量度和评

价生态可持续性方面是比较有效的, 但是只反映了当代人而不包括其他生物和后代人的生态盈亏(赤字)状态。(2) 生态足迹分析法是一种基于静态指标的分析方法。它假定研究对象的人口、技术、物质消费水平都是不变的, 因此得到人均生态足迹和生态赤字状态是瞬时性的, 无法反映未来的可持续趋势。(3) 生态足迹分析没有把自然系统提供资源、消纳废弃物的功能描述完全。另外, 现有的生态足迹分析中有关污染的生态影响这一点墨迹寥寥。(4) 生态足迹分析法是一个基于空间同质性的分析指标。在计算生态容量时, 假定各类资源在空间上分布是均一的, 这与实际情况明显不符, 因而在一定程度上扭曲了计算结果。

参考文献 (References):

- [1] Wackernagel M., Onisto L., and Bello P., *et al.* National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 1999, **29**: 375 ~ 390.
- [2] Rees, W. E. Ecological Footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves us [J]. *Environment and Urbanization*, 1992, **4** (2): 121 ~ 130.
- [3] Wackernagel M., Rees W. E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth [M]. New Society Publishers, Gabriola Island BC, and Philadelphia PA, 1995.
- [4] Wackernagel M., Onisto L., Bello P., *et al.* Footprints of Nations. Commissioned by the Earth Council for the Rio+5 Forum. International Council for Local Environmental Initiatives, Toronto, 1997, **26**: 167 ~ 172. Folk C, Jansson A, Larsson J, *et al.* Ecological appropriation by cities. *AMBIO*, 1997, **26**: 167 ~ 172.
- [5] Wackernagel M., Lewan, L., and Hansson, C. B. Evaluating the use of natural capital with the footprint [J]. *AMBIO*, 1999, **28** (7): 604 ~ 612.
- [6] Rees W. E., Wackernagel M. Appropriated Carrying Capacity: Measuring the Natural Capital Requirements of the human economy [A]. In: Jansson, A., *and detail.* (Eds). *Investing Natural Capital: Ecological Economics Approach to Sustainability* [C]. Island Press, Washington, D. C., 1994.
- [7] Zhang Zhiqiang, Xu Zhongmin, Cheng Guodong, *et al.* The Ecological Footprints of the 12 Provinces of West China in 1999 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56** (5): 599 ~ 609. [张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹 [J], *地理学报*, 2001, **56** (5): 599 ~ 609.]
- [8] Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong. Measuring sustainable development with the ecological Footprint Method: Take Zhangye Prefecture as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21** (9): 1484 ~ 1493. [徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年为例 [J]. *生态学报*, 2001, **21** (9): 1484 ~ 1493.]

The Application of Ecological Footprint to Evaluate Ecological Sustainability for Mountainous Area

—Take Beijing Western Mountainous Area as an Example

LI Hong¹, ZHANG Fengrong², SUN Danfeng², ZHOU Liandi¹

(1. *Research Institute of Plant Nutrients and Resources, Beijing Academy of*

Agriculture and Forestry Science, Beijing 100089, China;

2. *Resources and Environment College, China Agricultural University, Beijing 100094, China*)

Abstract: Basically Ecological Footprint (EF) is a new method to calculate and evaluate the using degree of humanity on the natural resources, and to quantify the ecological services for humanity by the nature. It represents the areas of land and water required to meet the demand of the goods and services of a defined human population or economy and to provide environmental assimilation capacity for keeping its environmental quality at a given level. In this study, the per capita ecological footprint and biological capacity of Mentougou district at 1999 were calculated on the basis of the theory and model of ecological footprint. According to the calculation model of EF, the population of Mentougou district was classified into two groups: rural residents and urban residents, and their ecological footprint was measured separately. Especially the footprint of the consumption of water and the drainage of sewage were computed for urban resident. On the other hand, the biological production land areas were obtained from the TM remote sensing image of 1999, then the per capita biological capacity was counted on them. Comparing the ecological footprint with biological capacity, Mentougou district was in ecological deficit, which meant it was unsustainable. On the basis of the analysis of different biological land, the reasons for the deficit were pointed, and the suggestions, which strengthened the construction and maintenance of the local environment, were put forward to decrease the ecological deficit. According to the research on Mentougou, the advantages and disadvantages of Ecological Footprint for evaluating ecological sustainability of mountainous county were concluded.

Key words: western mountainous area of Beijing, ecological footprint, ecological capacity, Ecological deficit, ecological sustainability evaluation