

# 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展

方 恺<sup>1,2</sup>, Heijungs Reinout<sup>1</sup>

(1. 荷兰莱顿大学环境科学系, 莱顿 2333CC; 2. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130012)

**摘 要:** 自然资本核算是可持续发展量化研究的重要课题。近年来颇具影响力的生态足迹方法, 为测度人类占用自然资本的状况提供了可行的途径。本文首先回顾了生态足迹方法应用于自然资本核算的研究成果, 然后从概念、计算方法和优缺点等方面评述了该领域的国际最新进展——生态足迹三维模型, 针对其存在的问题提出了改进和补充方案: ①通过明确生态赤字与生态盈余在自然资本性质方面的差异, 将存量资本和流量资本的分类测度扩展到具体的地类层面, 改进了区域尺度上的足迹深度、足迹广度和生态足迹计算方法, 以避免可能存在的生态赤字与生态盈余错误抵消的情况; ②构建了人均历史累积足迹广度、足迹广度基尼系数和理论足迹广度3项新指标, 以分别表征人均自然资本占用的历史累积水平、区域自然资本占用的不公平程度和自然资本存量持续减少对自然资本流量的潜在影响。最后分析了上述新增指标的局限性, 以及自然资本存量方面需要进一步探索的问题。

**关 键 词:** 自然资本; 生态足迹; 三维模型; 进展; 改进

## 1 引言

传统经济学视人造资本(包括人力资本)和自然资本的效用等同并可互相替代, 而生态经济学则认为两种资本之间存在显著的性质差异: 人造资本主要充当将资源流转换为产品流或服务流的媒介<sup>[1]</sup>; 自然资本不同于一般的人造资本, 它是一种特殊的资本要素, 其价值不仅体现在资源的经济价值, 还在于独有的生态服务价值及存量资本减少所产生的机会成本<sup>[2]</sup>。在当今社会, 自然资本已取代人造资本成为人类福祉的限制性因子<sup>[3-4]</sup>。尽管各方对自然资本的界定不尽一致<sup>①</sup>, 但多数生态经济学者认同Daly<sup>[8]</sup>的表述: 自然资本是指能提供产品流或服务流的自然收益和自然资源贮藏, 主要包括流量资本和存量资本两部分。其中, 流量资本维持着年际可再生资源流及其生态服务的供给, 在其不足时, 存量资本将作为补充而被消耗。此外, 生态经济学界的另一个共识是: 维持可持续发展的最低限度是保持自然资本存量不减少<sup>[3,9-11]</sup>。

自然资本核算是有效管理和合理利用自然资

源及生态服务的必要前提, 也是可持续发展量化研究的重要课题<sup>[3-4]</sup>。其核算的方法可以分为货币化和非货币化两种。从生态经济学的角度看, 货币化评估存在较大的局限: ①相当部分的自然资本还不具有市场, 也就意味着缺乏对应的市场价格<sup>[12]</sup>; ②市场价格波动, 特别是价格下降会掩盖自然资本存量减少的严峻形势<sup>[11]</sup>; ③一些自然资本的消耗或退化具有不可逆性, 其价值的不可替代性和稀缺性难以在短期内被市场充分估计。因此, 生物量遥感、物质流分析、能值分析和生态足迹分析等非货币化评估方法成为近年来的研究热点。特别是生态足迹方法, 尽管存在一些不足甚至缺陷<sup>[13]</sup>, 但不可否认, 它为测度人类占用自然资本状况提供了一条简便、直观的途径, 被誉为近20年来可持续发展量化领域最重要的进展<sup>[14]</sup>。

本文首先回顾生态足迹方法应用于自然资本核算的研究成果, 然后评述该领域的国际最新进展——生态足迹三维模型, 重点就其存在的问题提出改进和补充方案, 最后展望需要进一步探索的研究方向。

收稿日期: 2012-06; 修订日期: 2012-09.

基金项目: 国家公派留学基金项目(20113005)。

作者简介: 方恺(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生态经济学。E-mail: fang@cml.leidenuniv.nl

①有国内学者提出了“生态资产”或“生态资本”等相近的概念<sup>[5-6]</sup>。考虑到资本是经济学术语, 而资产是会计学术语, 且在范网上自然资本包含了生态资本<sup>[7]</sup>, 为了保持名称的一致性, 本文一律称“自然资本”。

## 2 生态足迹方法应用于自然资本核算的研究回顾

### 2.1 国外研究

为了克服传统经济学的弊端,在借鉴世界资源动态模型<sup>[15]</sup>、净初级生产力的人类占用<sup>[16]</sup>、人类承载力<sup>[17]</sup>和能值分析理论<sup>[18]</sup>等 20 世纪 70-80 年代生态经济学领域研究成果的基础上,Rees<sup>[19]</sup>于 1992 年首次提出了生态足迹的概念,并与 Wackernagel 等<sup>[20]</sup>一起将其发展成为生态足迹经典模型。该模型的基本思路是:采用生态足迹表征一定经济或人口规模下的自然资本需求,采用生物承载力表征该区域所能提供的自然资本收益,通过两者的对比来判断人类对自然资本的占用是否具有可持续性。这样既可以避免货币化评估对自然资本存量减少速度的低估,又能体现出自然资本的不可替代性<sup>[11]</sup>。

Wackernagel 等<sup>[11,20]</sup>最早将生态足迹方法应用于全球和国家层面的自然资本研究,并归纳出抑制自然资本存量持续减少的主要措施:控制人口增长、限制高消费、提升技术水平和效率、促进贸易公平、规范商业活动和资本流动,以及开征自然资本消耗税等;Monfreda 等<sup>[21]</sup>通过综合考虑原材料、生产、制成品等环节,改进了区域等国家以下层面的基于生态足迹的自然资本核算方法;Bastianoni 等<sup>[22]</sup>实证分析了意大利典型建筑的生态足迹,并评估了自然资本占用的经济价值及优化途径;Hoekstra<sup>[23]</sup>对比了生态足迹和水足迹在分析自然资本的人类

占用方面的异同点,认为二者对可持续性评价具有很好的互补性;Burkhard 等<sup>[24]</sup>将生态足迹与生态系统服务相结合,借助 GIS 刻画了土地利用变化下的自然资本供需变化;Malghan<sup>[25]</sup>通过定义存量一流量和资金一通量两个无量纲量,对生态足迹的耦合机制进行了探讨,认为生物物理评价方法的关键在于保持度量尺度(特别是资金一通量方面)一致性。

### 2.2 国内研究

国内生态足迹研究起步较晚,由徐中民等<sup>[26]</sup>于 2000 年率先开展。经过众多学者的努力,近年来我国在该领域的研究进度明显加快,取得了一批具有国际影响力的原创成果。如图 1 所示,在 Web of Science 系统中以“ecological footprint”为主题词进行文献检索,过去 20 年中全球载文量从 1992 年的 0 篇上升到 2011 年的 71 篇。其中,作者系中国科研单位(包括港澳台)的载文量在前 9 年一直为 0,从 2001 年起才有论文发表,后逐渐增加到 2011 年的 27 篇,占同期全球载文量的比例也显著提高(图 1)。但总的来看,目前国内生态足迹研究仍集中在区域可持续性的案例分析,关于自然资本核算方面的成果报道相对较少,主要有:鲁春霞等<sup>[27]</sup>估算了青藏高原的自然资本空间占用程度;刘航等<sup>[28]</sup>对武汉市在特定年份的自然资本供需情况进行了量化比较;刘建兴等<sup>[29]</sup>比较了中国与其他一些主要国家自然资本的占用水平;熊娜<sup>[30]</sup>采用生产性生态足迹检验了水、化石能源、土地等 3 类关键自然资本对中国省域及南水北调工程相关区域的影响。

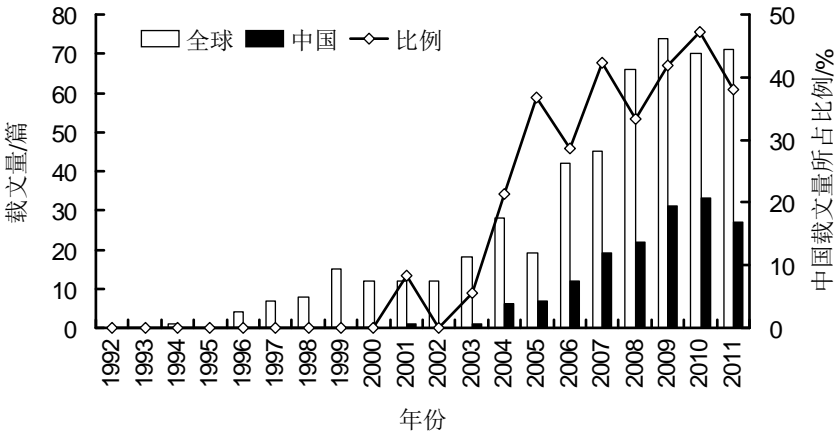


图1 1992-2011年全球和中国学者关于生态足迹研究的载文量(基于 Web of Science 检索系统)

Fig.1 Number of articles for “ecological footprint” delivered by global and China’s scholars during 1992-2011 by searching the Web of Science

### 3 最新进展——生态足迹三维模型评述

#### 3.1 模型介绍

生态足迹三维模型是生态足迹分析与自然资源核算交叉领域的国际最新进展。以往的生态足迹经典模型及其后来的一系列改进模型,尽管均承认自然资源在可持续发展中的重要性,但关注点主要在流量而非存量<sup>[14]</sup>,无法体现自然资源存量恒定对维持全球生态系统平衡所起的关键性作用。为明确区分存量资本和流量资本,Niccolucci等<sup>[31-32]</sup>最近尝试构建了生态足迹三维模型,通过引入两项新指标——足迹深度和足迹广度,来分别表征人类对自然资源存量和流量的利用水平。

从模型维度看,以往的生态足迹模型多数属于二维模型,由生物承载力(内圆)和生态赤字(圆环)相加得到(图2a);而三维模型视生态足迹为一个圆柱体,由足迹广度(底面)和足迹深度(柱高)相乘得到(图2b)。由此,以下等式成立<sup>[31]</sup>:

$$EF = BC + ED = EF_{depth} \times EF_{size} \quad (1)$$

式中:  $EF$  为生态足迹( $\text{hm}^2$ );  $BC$  为生物承载力( $\text{hm}^2$ );  $ED$  为生态赤字( $\text{hm}^2$ );  $EF_{depth}$  为足迹深度(无量纲);  $EF_{size}$  为足迹广度( $\text{hm}^2$ )。足迹广度和足迹深度的引入,实现了对生态足迹二维模型的增维,但由于足迹广度在单位上仍采用  $\text{hm}^2$ ,所以根据公式(1),足迹深度在量纲上是0次幂形式,即无量纲量。

足迹深度是指为维持区域现有资源消费水平,理论上所需占用的区域土地面积的倍数,它表征了人类消耗自然资源存量的程度,其计算公式为<sup>[31]</sup>:

$$EF_{depth} = 1 + \frac{ED}{BC} \quad (2)$$

足迹广度是指在区域生物承载力限度内,实际所占用的生物生产性土地的面积,它表征了人类占

用自然资源流量的水平,其取值范围为<sup>[32]</sup>:

$$0 < EF_{size} \leq BC \quad (3)$$

生态足迹三维模型相比于一般的二维模型具有显著的优势:①明确将自然资源存量减少与否作为可持续性的基本判据,通过模型增维实现了对自然资源存量和流量的分类测度,丰富了生态足迹方法的经济学内涵;②不仅强调土地资源的空间稀缺性(代内公平),更关注资源消费与资源再生之间的不同步性(代际公平),使其真正成为一个时空模型;③克服了单纯以生态足迹或生态赤字比较区域之间可持续性的局限,增强了不同区域、不同时期之间的结果可比性。

但正如创立者 Niccolucci 等<sup>[31-32]</sup>所言,生态足迹三维模型作为一项尝试性的研究,在理论和方法上还存在一些不足或局限,影响了所得结果的科学性与准确性。笔者结合前期的实证研究<sup>[33-34]</sup>及思考,试围绕以下几个问题对三维模型进行改进和补充。

#### 3.2 模型改进

##### 3.2.1 如何计算某一区域的足迹深度

式(2)表明,准确的生态赤字结果是计算足迹深度的前提和关键。对单一地类(如耕地)而言,生态赤字的确等于该地类的生态足迹与生物承载力的差值。但一个区域通常包含多种地类,如果仍由各地类生态足迹之和与生物承载力之和相减得到区域生态赤字,可能会在一定程度上低估生态赤字的真实状况。其原因在于:一些地类(如耕地)的生态赤字,存在部分被其他地类(如草地)的生态盈余所抵消的情况,从而导致所得的区域生态赤字和区域足迹深度偏小。从自然资源的性质看,生态赤字代表了具有虚拟属性的存量资本负债,而生态盈余则代表了具有物质属性的流量资本收益(土地面积),两者因性质不同而不符合线性加和的原则。因此,区域生态赤字的计算需要基于详细的各地类生态赤字数据,而非只是基于最终的区域累加数据。区域生态赤字的计算公式为:

$$ED_{region} = \sum_i^n ED_i = \sum_i^n \max(EF_i - BC_i, 0) \quad (4)$$

式中:  $ED_{region}$  为区域生态赤字;  $ED_i$  为  $i$  地类的生态赤字;  $n$  为地类数;  $EF_i$  为  $i$  地类的生态足迹(已均衡化,下同);  $BC_i$  为  $i$  地类的生物承载力(已均衡化,下同)。由此,区域足迹深度( $EF_{depth,region}$ )的计算公式为:

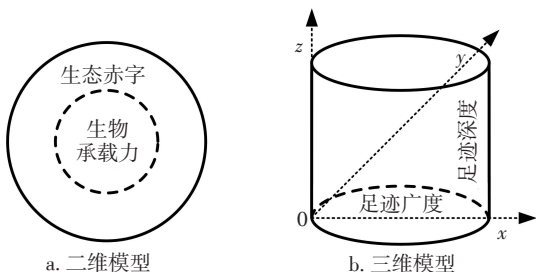


图2 生态足迹二维模型与三维模型的对比<sup>[31]</sup>

Fig.2 Comparison between 2D model and 3D model of ecological footprint



$$EF_{depth,region} = 1 + \frac{ED_{region}}{BC} = 1 + \frac{\sum_i^n \max(EF_i - BC_i, 0)}{\sum_i^n BC_i} \quad (5)$$

### 3.2.2 如何计算某一区域的足迹广度

生态足迹三维模型并未给出明确的足迹广度计算方法。但根据定义,足迹广度实际取生态足迹和生物承载力中的较小值,其计算公式为:

$$EF_{size} = \min\{EF, BC\} \quad (6)$$

根据数学法则,以下不等式成立:

$$\begin{aligned} \sum_i^n EF_{size,i} &= \sum_i^n \min\{EF_i, BC_i\} \\ &\leq \min\left\{\sum_i^n EF_i, \sum_i^n BC_i\right\} \\ &= EF_{size} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $EF_{size,i}$  为  $i$  地类的足迹广度。

区域足迹广度所表征的自然资本流量是空间的函数,同样需要基于详细的各地类足迹广度数据。公式(7)表明,由不同地类累加得到的足迹广度小于或等于由各地类生态足迹之和与生物承载力之和相比得到的足迹广度。由此,区域足迹广度 ( $EF_{size,region}$ ) 的计算公式为:

$$EF_{size,region} = \sum_i^n EF_{size,i} = \sum_i^n \min\{EF_i, BC_i\} \quad (8)$$

### 3.2.3 三维模型改进前后在生态足迹结果计算方面的差异

生态足迹三维模型通过足迹深度和足迹广度将生态足迹分解为  $z$  轴和  $xoy$  平面两个方向的分量(图2b),而这两项指标的计算均需要基于生态足迹和生物承载力数据,所以生态足迹三维模型与二维模型并不对立,前者是后者的延伸,后者是前者的基础。理论上,基于三维模型的生态足迹是表征体积而非面积的物理量,但其数值大小和单位实际仍与二维模型一致:

$$EF_{3D} = EF_{depth} \times EF_{size} = EF_{2D} \quad (9)$$

式中:  $EF_{3D}$  为基于三维模型(改进前)的生态足迹(即各地类生态足迹之和);  $EF_{2D}$  为基于二维模型的生态足迹。

三维模型改进前后在生态足迹计算方面存在差异:前者与经典的二维模型一致,认为一个区域的生态足迹等于各地类生态足迹之和;而后者则需要基于详细的各地类生态足迹和生物承载力数据,其计算公式为:

$$\begin{aligned} EF_{region} &= BC_{region} + ED_{region} \\ &= BC_{region} \times \left(1 + \frac{ED_{region}}{BC_{region}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} EF_{region} &\geq \sum_i^n EF_i = EF_{3D}, \\ BC_{region} &= \sum_i^n BC_i = BC \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $EF_{region}$  为基于三维模型(改进后)的区域生态足迹;  $BC_{region}$  为基于三维模型(改进后)的区域生物承载力。由此,以下不等式成立:

$$\begin{aligned} EF_{region} &= BC \times EF_{depth,region} \\ &= \sum_i^n BC_i \times \left(1 + \frac{ED_{region}}{\sum_i^n BC_i}\right) \\ &\geq \sum_i^n \min\{EF_i, BC_i\} \times \left(1 + \frac{ED_{region}}{BC}\right) \\ &= EF_{size,region} \times EF_{depth,region} \end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$EF_{depth,region} \geq EF_{depth,3D}, EF_{size,region} \leq EF_{size,3D} \quad (13)$$

式中:  $EF_{depth,3D}$  为基于三维模型(改进前)的足迹深度;  $EF_{size,3D}$  为基于三维模型(改进前)的足迹广度。

式(9)~(13)表明:①区域生态足迹大于或等于各地类生态足迹之和,且仅当区域所有地类均为生态赤字时才取等号;②不论三维模型改进与否,区域生物承载力始终等于各地类生物承载力之和;③区域足迹深度与区域足迹广度之积小于或等于区域生态足迹,且仅当区域所有地类均为生态赤字时才取等号;④区域足迹深度大于或等于改进前的足迹深度,区域足迹广度小于或等于改进前的足迹广度,且仅当区域所有地类均为生态赤字或均为生态盈余时才取等号。与改进前相比,生态足迹三维模型在改进后对自然资本流动路径的追踪更为细致,将存量资本和流量资本的分类测度扩展到区域以下具体的地类层面,从而避免了可能存在的生态赤字与生态盈余错误抵消的情况,这是生态足迹计算结果较改进前有所差异的根本原因。

## 3.3 模型补充

### 3.3.1 如何基于历史责任测度各国的自然资本流量占用水平

根据可持续发展公平性原则,人类对全球自然资源和生态服务拥有同等享用权,人均历史累积指标最能体现这种“共同但有区别”的责任原则<sup>[35]</sup>。足迹广度作为表征自然资本流量占用水平的指标,在一定程度上反映了区域实际可利用的自然资源

禀赋。借鉴气候变化领域的相关研究,提出“人均历史累积足迹广度”指标,从历史责任的角度表征各国人均自然资本流量的累积占用水平,其计算公式如下:

$$ef_{size,accum.} = \sum_j EF_j / N_j + \sum_j^{y-m} BC_j / N_j \quad (14)$$

其中:

$$EF^m < BC^m, EF^{m+1} \geq BC^{m+1} \quad (15)$$

式中:  $ef_{size,region}$  为人均历史累积足迹广度;  $EF_j$  为  $j$  年的生态足迹;  $N_i$  为  $j$  年的人口数;  $m$  为生态盈余的年数;  $y$  为总年数;  $BC_j$  为  $j$  年的生物承载力。指标计算起始年份(基年)的选择,既要综合考虑各国统计数据的可得性和有效性,又不能距离现在太近,否则有违缩小发达国家与发展中国家历史不公平程度的初衷,建议在 1950-1990 年之间视具体情况而定。

在量化各国历史责任的基础上,可以采取以下两项措施促进自然资本流量在全球范围内的配置均等化:①高人均足迹广度国家根据其低人均足迹广度国家之间的累积差异,以经济或技术形式给予后者一定的配额补偿;②确定未来若干年内的全球足迹广度总量限额,并分配各国的足迹广度额度,允许国家间按照一定的规范进行配额交易。

### 3.3.2 如何反映区域内部自然资本流量占用的不公平程度

借鉴经济学中基尼系数的内涵,提出“足迹广度基尼系数”指标,以表征区域内部人均自然资本流量占用的不公平程度。当某项指标呈离散型分布,且参照指标(如人口数)在各组近似等分时,可以采用梯形面积法计算其基尼系数(即 Lorenz 曲线与横坐标轴所夹面积),其计算公式为<sup>[36]</sup>:

$$G = 1 - \sum_i^n [(x_i - x_{i-1}) \times (y_i + y_{i-1})] \quad (16)$$

式中:  $G$  为某项指标的基尼系数;  $x$  为参照指标(如人口数、GDP)的累积比例;  $y$  为该指标的累积比例;  $n$  为次区域数;  $i$  为按该指标高低排列的次区域序号,当  $i=1$  时,  $x_{i-1}=y_{i-1}=0$ 。

目前多数资源环境类研究采用式(16)计算基尼系数,但由于次区域之间的人口数和 GDP 等参照指标存在显著差异,难以保证 Lorenz 曲线的相邻各点等距,本文根据矩形面积法<sup>[37]</sup>得到了更为一般化的足迹广度基尼系数计算公式:

$$G_{EF_{size}} = 2 \sum_i^n (\lambda_{EF_{size}^i} \times \sum_i^n \lambda_{pop,i}) - \sum_i^n (\lambda_{EF_{size}^i} \times \lambda_{pop,i}) - 1 \quad (17)$$

$$0 \leq G_{EF_{size}} < 1$$

式中:  $G_{EF_{size}}$  为足迹广度基尼系数;  $\lambda_{EF_{size}^i}$  为  $i$  号次区域足迹广度占整个区域足迹广度的比例;  $\lambda_{pop,i}$  为  $i$  号次区域人口数占整个区域人口总数的比例;  $\sum_i^n \lambda_{pop,i}$  为 1~ $i$  号次区域人口数占整个区域人口总数的累积比例。当考察全球层面时,次区域以国为单位进行划分;当考察国家层面时,次区域以省为单位进行划分……以此类推。足迹广度基尼系数的划分标准可以近似参照经济学中的基尼系数等级,即  $G \leq 0.2$  表示高度均衡;  $0.2 < G \leq 0.3$  表示较为均衡;  $0.3 < G \leq 0.4$  表示相对合理;  $0.4 < G \leq 0.5$  表示较为不均衡;  $G > 0.5$  表示高度不均衡<sup>[36]</sup>。

### 3.3.3 如何量化自然资本存量减少对自然资本流量的潜在影响

如果生态系统在供给社会经济系统的过程中消耗了自然资本存量,应考虑在计算下一年的自然资本流量供给时,扣除该年存量资本减少所对应的生物生产性土地<sup>[38]</sup>。由此提出“理论足迹广度”指标,以表征自然资本存量持续减少对自然资本流量的潜在制约作用,其计算公式为:

$$EF_{size,accum.}^y = EF_{size,ann.}^y - (EF_{dep th}^{y-1} - 1) BC_{ann.}^{y-1} \quad (18)$$

式中:  $EF_{size,accum.}^y$  为  $y$  年的理论足迹广度;  $EF_{size,ann.}^y$  为  $y$  年的实际足迹广度;  $EF_{dep th}^{y-1}$  为  $y-1$  年的足迹深度;  $BC_{ann.}^{y-1}$  为  $y-1$  年的生物承载力。当  $EF_{size,ann.}^y \leq ED_{ann.}^{y-1}$  时,  $EF_{size,accum.}^y = 0$ , 表明自然资本存量的大幅减少已严重阻碍了自然资本流量的可更新能力。

式(18)进一步反映了生态赤字与生态盈余之间的性质差异:生态赤字可以逐年累加,对生态系统的负向影响具有累积性;而生态盈余则无法逐年累加,对生态系统的正向影响也不具有累积性。这可以从生态学的角度加以解释:一个长期生态盈余的生态系统,一旦无法满足人类资源消费和废弃物排放所需的自然资本流量,就会立即消耗自然资本存量以维持自身稳定,存量资本的减少反过来又会抑制生态系统的生产力,削弱下一年的自然资本流动性,从而对生态系统服务的功能性状产生持续负向影响;反之,一个长期生态赤字的生态系统,并不会因为暂时的生态盈余而改变不可更新资源严重消耗的现状,即新增自然资本流量无法弥补上一年损

失的自然资本存量。

## 4 结论

本文简要回顾了国内外将生态足迹方法应用于自然资本核算的研究成果,系统评述了生态足迹三维模型的概念、计算方法及主要优势,并围绕其存在的问题对模型进行了改进和补充:①改进了现有指标的计算方法,从自然资本的角度明确了生态赤字与生态盈余的性质差异,在此基础上重新推导了足迹深度、足迹广度和生态足迹3项指标在区域尺度上的计算公式,避免了可能存在的低估区域足迹深度和区域生态足迹、高估区域足迹广度的缺陷,更为准确地揭示了自然资本所面临的严峻形势;②借鉴气候变化、经济学和生态学等领域的研究成果,构建了人均历史累积足迹广度、足迹广度基尼系数和理论足迹广度3项新指标,以分别表征人均自然资本占用的历史累积水平、区域自然资本占用的不公平程度和自然资本存量持续减少对自然资本流量的潜在影响,丰富了模型的理论内涵和指标体系。总之,经本文改进和补充的生态足迹三维模型,能较为全面地揭示自然资本存量与流量之间的内在关系,以及存量资本恒定对维持生态系统平衡的重要性,为深化自然资本核算研究提供了一定的理论依据。

同时也必须指出,由于篇幅所限,本文对模型的改进和补充还缺乏具体案例验证,特别是上述3项新增指标仍存在一些需要完善之处:①人均历史累积足迹广度只是基于公平性原则来考虑自然资本流量占用的历史责任,而未考虑各国经济社会发展水平的差异和对未来自然资本需求的变化趋势,历史累积计算的时段选择及所需统计数据的来源等也存在较大的不确定性;②足迹广度基尼系数只能从总体上比较区域之间自然资本占用的相对差异及不公平程度,却无法反映区域之间的绝对差异及区域的实际状况,且几何法(包括梯形法和矩形法)求解基尼系数始终存在结果偏低的情况(因为近似积分面积必然小于实际面积),从而影响到决策制定的科学性;③理论足迹广度尝试性地对自然资本存量持续减少的潜在生态影响进行量化,其结果本身反映生态系统负债所造成的资本收益折损,是一个理论值而非真实值,特别是在长期生态赤字背

景下,理论足迹广度与实际足迹广度将明显背离。

前期实证研究表明<sup>[33-34]</sup>,在进行自然资本利用的空间尺度比较时,不能仅仅根据生态足迹或生态赤字的数值大小进行简单排序,而应结合各区域的实际特点,重点分析资源消费的代际公平性(区域足迹深度)和代内公平性(区域足迹广度)特征,比较生态赤字(或生态盈余)在地类分布和产生原因等方面的差异。此外,还有一些自然资本存量方面的关键性问题有待进一步探讨:自然资本存量减少对生态系统服务功能的具体影响是什么,自然资本存量耗竭的生态阈值又是多少<sup>[39]</sup>。正如宏观经济学中采用永续盘存法<sup>[40]</sup>估算物质资本存量一样,生态经济学者也应积极探索构建普适性的自然资本存量测度方法,这对于深化自然资本核算研究,促进生态学与经济学的进一步交叉与融合,都将具有十分重要的意义。

## 参考文献

- [1] 钟方雷, 徐中民, 张志强. 生态经济学与传统经济学差异辨析. 地球科学进展, 2008, 23(4): 401-407.
- [2] 蒋萍, 刘渊. 可持续范式与可持续发展测度. 江西财经大学学报, 2012(1): 11-17.
- [3] Costanza R, Daly H E. Natural capital and sustainable development. Conservation Biology, 1992, 6(1): 37-38.
- [4] Farley J, Daly H E. Natural capital: the limiting factor: A reply to Aroso, Blignaut, Milton and Clewell. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 6-10.
- [5] 黄兴文, 陈百明. 中国生态资产区划的理论与应用. 生态学报, 1999, 19(5): 602-606.
- [6] 李海涛, 许学工, 肖笃宁. 基于能值理论的生态资本价值: 以阜康市天山北坡中段森林区生态系统为例. 生态学报, 2005, 25(6): 1383-1390.
- [7] 陈尚, 任大川, 李京梅, 等. 海洋生态资本概念与属性界定. 生态学报, 2010, 30(23): 6323-6330.
- [8] Daly H E. Beyond growth: The Economics of Sustainable Development. Boston: Beacon Press, 1996: 25-76.
- [9] Pearce D, Barbier E, Markandya A. Blueprint for a Green Economy: A Report for the UK Department of the Environment. London: Earthscan Publications, 1989: 43-44.
- [10] Pezzey J. Economic analysis of sustainable growth and sustainable development. Washington D C: World Bank, 1990: 88.
- [11] Wackemagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an



- ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [12] 陈亮, 王如松, 李爱仙, 等. 区域自然资本与自然资本持续度评价: 以北京市为案例. *城市发展研究*, 2009, 16(12): 51-55.
- [13] 王云平, 别雪艳. 生态足迹模型测度可持续发展的缺陷分析. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 424-428.
- [14] 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.
- [15] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. *Limits to Growth*. New York: Universe Books, 1972: 205.
- [16] Vitousek P M, Ehrlich P R, Ehrlich A H, et al. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience*, 1986, 36(6): 368-373.
- [17] Ehrlich P R. Human carrying capacity, extinction, and nature reserves. *Bioscience*, 1982, 32(5): 331-333.
- [18] Odum H T. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [19] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [20] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [21] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 231-246.
- [22] Bastianoni S, Galli A, Pulselli R M, et al. Environmental and economic evaluation of natural capital appropriation through building construction: Practical case study in the Italian context. *Ambio*, 2007, 36(7): 527-533.
- [23] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [24] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21(SI): 17-29.
- [25] Malghan D. A dimensionally consistent aggregation framework for biophysical metrics. *Ecological Economics*, 2011, 70(5): 900-909.
- [26] 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.
- [27] 鲁春霞, 谢高地, 成升魁, 等. 青藏高原自然资产利用的生态空间占用评价. *资源科学*, 2001, 23(6): 29-35.
- [28] 刘航, 宋豫秦. 基于生态足迹方法的武汉市自然资本分析. *生态环境*, 2008, 17(2): 818-822.
- [29] 刘建兴, 许肃. 基于生态足迹的自然资本利用状况国际比较. *环境科学与技术*, 2010, 33(S2): 633-638.
- [30] 熊娜. 中国三类自然资本的关键性检验与分析: 1949-2007 年. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1942-1849.
- [31] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation. *Ecological Modelling*, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [32] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography. *Ecological Modelling*, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [33] 方恺, 李焕承. 基于生态足迹深度和广度的中国自然资本利用省际格局. *自然资源学报*, 2012, 27(12).
- [34] 方恺, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较. *地理研究*, 2013, 32.
- [35] 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2050 年大气 CO<sub>2</sub> 浓度控制: 各国排放权计算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(8): 1009-1027.
- [36] 刘颖, 谢萌, 丁勇. 对基尼系数计算方法的比较与思考. *统计与决策*, 2004(9): 15-16.
- [37] 徐万坪. 基尼系数的算法. *统计与决策*, 2004(9): 121-122.
- [38] 谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞, 等. 中国生态资源承载力研究. 北京: 科学出版社, 2011: 86.
- [39] Kitzes J, Wackernagel M, Loh J, et al. Shrink and share: humanity's present and future Ecological Footprint. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363(1491): 467-475.
- [40] Goldsmith R W. A perpetual inventory of national wealth// Goldsmith R W. *Studies In Income and Wealth*. New York: National Bureau of Economic Research, 1951: 5-74.

# A Review on Three-Dimensional Ecological Footprint Model for Natural Capital Accounting

FANG Kai<sup>1,2</sup>, HEIJUNGS Reinout<sup>1</sup>

(1. Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden 2333CC, Netherlands;  
2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Natural capital accounting is one of the key research topics in the field of quantitative sustainability assessment. The ecological footprint, which has reached considerable popularity over the past few years, offers us an opportunity to evaluate the natural capital appropriated by humanity. This paper first introduces the research achievements of the ecological footprint applied to the natural capital measurement. Afterwards a three-dimensional ecological footprint model, the latest development in relevant fields, is introduced in terms of its concept, calculation method and main characteristics. In response to the existing shortcomings and deficiencies we identify, the paper makes a great contribution to the model modification and extension in the following two aspects. One attempt is to modify the calculation methods of three key indicators-regional footprint depth, regional footprint size and regional ecological footprint, so as to avoid underestimating the depletion rate of natural capital stocks, and to avoid the possibility that the ecological deficit and ecological surplus are partly offset by each other because they are in different natures from a perspective of natural capital. The differences exist in results before and after the modification of the three-dimensional ecological footprint model, where a fundamental change is that the classification and measure of the capital stocks and capital flows are extended to the specific land types within a given region. The other attempt is to build three indicators, namely Per Capita Historical Cumulative Footprint Size, Gini Coefficient of Footprint Size, and Theoretical Footprint Size. They are designed for representing the historically cumulative appropriation of natural capital, the inter-regional inequalities in natural capital appropriation, and the impact of decline in natural capital stocks on natural capital flows, respectively. Finally, this paper discusses the limitations of the three emerging indicators, and proposes some priorities for further improvement on measuring the use of natural capital stocks.

**Key words:** natural capital; ecological footprint; three-dimensional model; research progress; modification

本文引用格式:  
方恺, Heijungs Reinout. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1700-1707.