

基于三维生态足迹模型优化的自然资本 利用国际比较

方 恺¹, 高 凯², 李焕承³

(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;
3. 深圳市环境科学研究院, 深圳 518001)

摘要: 维持自然资本存量恒定是人类社会可持续发展的基础。在介绍三维生态足迹模型的基础上, 根据推导的区域足迹广度和区域足迹深度的计算公式, 评估和比较2007年全球11个主要国家的自然资本利用状况, 并分析模型优化前后的结果差异。结果表明: ①全球自然资本流量的人均占用为1.71 hm², 人类需要1.55个地球才能支撑其资源消费量, 化石能源碳排放是最主要的存量自然资本利用方式和生态超载驱动力; ②各国的流量资本占用能力依次为加拿大>俄罗斯>美国>巴西>法国>德国>全球>意大利>中国>英国>日本>印度, 存量资本消耗程度则基本呈逆向排列; ③美、法、德等发达国家所利用的人均流量资本和存量资本均明显高于全球平均水平, 应给予印、中等发展中国家一定的配额补偿; ④模型优化后, 全球人均足迹广度减少了0.09 hm², 足迹深度则增加了0.05, 这更符合各国自然资本利用和生态赤字的实际; ⑤中国面临增加国民收入和控制生态赤字的双重挑战, 应将草地作为资本利用的优先方向, 并适当控制城镇扩张速度。

关键词: 自然资本; 三维生态足迹; 足迹广度; 足迹深度; 模型优化; 国际比较

DOI: 10.11821/dljy201309008

1 引言

自然资本是生态系统所提供的自然资源和生态服务的总称^[1]。它分为流量资本和存量资本两部分^①: 流量资本是指可再生资源流及其生态服务的年际供给; 存量资本是指不可再生资源流的累积储备, 仅在流量资本不足时才会被消耗。生态经济学理论认为, 要实现可持续发展, 最低限度是维持存量资本的恒定^[2,3]。然而, 无论从区域还是全球范围来看, 人类对自然资源和生态服务的需求均大大超过了生态系统可承载的供给能力, 自然资本日益成为人类福祉与可持续发展的限制性因子^[4]。在这样的背景下, 如何客观、准确地测度人类对自然资本的利用状况, 特别是资本存量减少这一社会发展进程中必须面对的现实挑战, 显得尤为重要。

生态足迹分析方法具有直观、综合和可操作性强的特点, 为评估区域自然资本利用状况提供了简明的框架^[5], 但局限之一是未对流量资本和存量资本进行区分^[6]。为此,

收稿日期: 2012-06-13; 修订日期: 2013-01-24

基金项目: 国家公派留学基金项目 (20113005)

作者简介: 方恺 (1986-), 男, 浙江杭州人, 博士研究生, 主要从事生态经济与产业生态学研究。

E-mail: fang@cml.leidenuniv.nl

① 流量与存量的物理意义区别在于: 流量可以在某一位置上测度, 是面积 (空间) 的函数; 存量在某一时点上测度, 是时间的函数。

Niccolucci 等^[7,8]在大量既有成果的基础上,提出了三维生态足迹(three dimensional ecological footprint, EF_{3D})的概念,即引入足迹广度(footprint size, EF_{size})和足迹深度(footprint depth, EF_{depth})两项新指标,以分别表征人类对流量资本和存量资本两方面的利用程度。本文在介绍三维生态足迹模型的基础上,通过区域足迹广度和区域足迹深度的计算优化,评估和比较全球主要国家的自然资本利用状况,并对模型优化前后的结果差异进行分析,以期推动该方向研究在我国尽早开展,同时为协调各国间的可持续发展战略提供参考。

2 模型概述与优化

2.1 概念和计算方法

Daly 等^[3]提出了实现可持续发展需要遵循的3项基本准则:①可再生资源(如生物资源)的占用速度不应快于其再生速度;②不可再生资源(如化石能源)的消耗速度不应快于相应可再生资源的替代速度;③污染和废物的排放速度不应快于生态系统代谢修复的速度。简言之,只要存量资本不减少,即便流量资本被全部占用,也仍符合可持续发展的最低要求。三维生态足迹模型基于Daly准则,将为人类提供资源产品和废弃物(主要是CO₂)消纳服务的自然资本分为流量资本和存量资本两部分,并以存量资本减少与否作为可持续性的基本判据。

三维生态足迹的计算主要涉及下列5项指标^②:

(1) 生物承载力(biocapacity, BC)。生物承载力的概念和计算方法均与传统模型一致,即反映了区域为人类所能提供的可再生资源和生态服务。

(2) 生态赤字或生态超载(ecological deficit, ED 或 ecological overshoot, EO)。生态赤字反映了生态足迹与生物承载力间的相对差异,是与生态盈余相对应的概念。在全球尺度上,由于没有资源贸易的影响,生态赤字等同于生态超载,反映了人类对超出地球生物承载力部分的资源需求。

(3) 足迹广度。足迹广度表征了人类占用自然资本流量的大小。由于资本流动不会减少财富总量^[9],故足迹广度并不损害生态系统的可持续性。

(4) 足迹深度。足迹深度表征了人类消耗自然资本存量的程度,它具体可表述为等价的两层含义:①需要多少个地球才能支撑当前全球人口的资源消费量;②需要多少年才能再生人类在1 a中的资源消费量。足迹深度的计算公式为^[7]:

$$EF_{depth} = 1 + \frac{ED}{BC} \tag{1}$$

可见, $EF_{depth} \geq 1$: ①当 $EF \leq BC$ 时, $EF_{depth} = 1$, 此时人类只需占用流量资本即可满足自身需求; ②当 $EF > BC$ 时, $EF_{depth} > 1$, 此时流量资本已无法完全满足人类需求, 开始消耗存量资本。 EF_{depth} 越高, 表明实际消耗的资本存量越多, 发展越不可持续。

(5) 三维生态足迹。若将传统生态足迹视为由生物承载力(内圆)和生态赤字(圆环)相加得到的圆面(图1左), 则三维生态足迹是由足迹广度(底面)和足迹深度(柱高)相乘得到的圆柱体(图1右)。因此, 三维生态足迹不再表征面积, 而是表征体积的物理量(尽管单位 hm^2 未变)。三维生态足迹的计算公式为^[8]:

② 除足迹深度无量纲外, 其他4项指标均以 hm^2 为单位。

$$EF_{3D} = EF_{size} \times EF_{depth} \tag{2}$$

2.2 主要特点

2.2.1 区分流量资本和存量资本

流量资本占用与存量资本消耗是可持续发展的两个核心议题^[7]。前面提到，足迹广度和足迹深度分别表征了人类利用的自然资本流量和存量。可见，对流量资本和存量资本进行区分和测度，将资本存量变化作为可持续性的基本判据，是三维生态足迹模型有别于传统模型的最显著的特点与优势。

2.2.2 具有时空双重属性 足迹深度反映了超出生物承载力部分的自然资本消耗，具有时间属性，可以逐年累加；足迹广度反映了生物生产性土地的年际占用，具有空间属性，可以逐地类累加。因此，三维生态足迹模型具有时空两方面的属性：既强调空间（土地）资源的稀缺性，又关注不可再生资源消费与可再生资源替代在时间上的不同步性^[10]。

2.2.3 强调代内公平和代际公平 单纯的生态盈余或生态赤字不一定能反映区域生态系统的可持续性状态^[11]。而在三维生态足迹模型中，足迹广度可以反映同一时期不同区域间的资源消费和生态服务的公平性差异，足迹深度可以反映同一区域内不同时期的资源消费和生态服务的公平性差异，从而增强了结果的横向和纵向可比性。

2.3 模型优化

2.3.1 区域足迹广度计算 Niccolucci 等^[7,8]未给出明确的足迹广度计算方法。由于生态系统可提供的自然资本流量上限为生物承载力，故足迹广度的含义可表述为：在生物承载力限度内的生物生产性土地年际占用面积。因此，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^[10]：

$$EF_{size} = \min\{EF, BC\} \tag{3}$$

不同地类均对应各自的足迹广度（即足迹广度的构成）。根据数学法则，下列不等式成立：

$$\sum_{i=1}^n EF_{size,i} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \leq \min\left\{\sum_{i=1}^n EF_i, \sum_{i=1}^n BC_i\right\} = EF_{size} \tag{4}$$

式中： $EF_{size,i}$ 为第*i*地类的足迹广度； EF_i 为第*i*地类的生态足迹； BC_i 为第*i*地类的生物承载力。

可见，由不同地类累加得到的足迹广度（真实值）小于或等于直接由区域生态足迹和生物承载力得到的足迹广度（理论值）。区域足迹广度所表征的资本流量是空间的函数，应由所有地类的足迹广度累加得到。因此，区域足迹广度的计算公式为^[10]：

$$EF_{size,region} = \sum_{i=1}^n EF_{size,i} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \tag{5}$$

式中： $EF_{size,region}$ 为某一区域的足迹广度。

2.3.2 区域足迹深度计算 Niccolucci 等^[7,8]给出的足迹深度计算方法仅适用于单一地类。本文从与足迹深度密切相关的生态赤字入手，对计算方法进行优化。根据概念，生态赤字仅在存量资本被消耗时存在，否则为0，其计算公式为^[10]：

$$ED_{region} = \sum_{i=1}^n ED = \sum_{i=1}^n \max\{EF_i - BC_i, 0\} \tag{6}$$

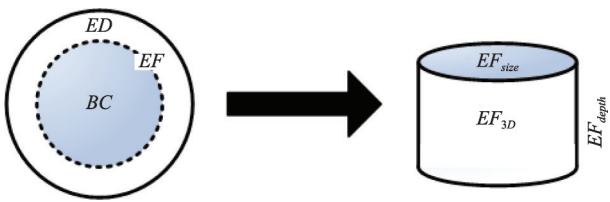


图1 生态足迹模型由二维向三维的演变^[7]
Fig. 1 Development of the ecological footprint models from 2D to 3D

式中： ED_{region} 为区域生态赤字； ED_i 为第 i 地类的生态赤字。

与足迹广度类似，不同地类也均对应各自的足迹深度（即足迹深度的构成）。但特别需要强调的是，足迹深度所表征的资本存量是时间的函数，不能由不同地类累加得到区域足迹深度，即下列等式不成立：

$$EF_{depth,region} \neq \sum_{i=1}^n EF_{depth,i} = n + \sum_{i=1}^n \frac{ED_i}{BC_i} \tag{7}$$

式中： $EF_{depth,region}$ 为某一区域的足迹深度； $EF_{depth,i}$ 为第 i 地类的足迹深度； ED_i 为第 i 地类的生态赤字。

可见，计算区域足迹深度的关键还在于合理确定区域生态赤字。实际上，生态足迹和生物承载力在不同地类间累加会在一定程度上掩盖区域生态赤字的真实状况，这是因为某些地类（如耕地）的生态赤字可能会部分地被其他地类（如草地）的生态盈余所补偿，从而导致得到的区域生态赤字偏小^[8]。生态盈余和生态赤字虽然单位相同，但并不能相互抵消：生态盈余的实质是一种剩余生物承载力，属于真实存在的土地面积，无法逐年累加；而生态赤字表征的是人类透支的虚拟土地面积，类似于一种生态债务，可以逐年累加。因此，由不同地类累加得到的生态赤字（真实值）大于或等于直接由区域生态足迹和生物承载力得到的生态赤字（理论值），故下列不等式成立：

$$\sum_{i=1}^n ED_i \geq ED \tag{8}$$

也即：

$$1 + \frac{\sum_{i=1}^n ED_i}{BC} \geq 1 + \frac{ED}{BC} = EF_{depth} \tag{9}$$

可见，由实际区域生态赤字得到的足迹深度（真实值）也大于或等于由理论区域生态赤字得到的足迹深度（理论值）。因此，区域足迹深度的计算公式为：

$$EF_{depth,region} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n ED_i}{BC} \tag{10}$$

2.3.3 物理意义及取值 区域足迹广度反映了生物承载力内的流量资本实际占用量；超出部分的存量资本消耗量程度则表现为区域足迹深度。在生态赤字普遍存在的背景下，为最大限度地维持可持续发展，应尽可能提高自然资本的流动性，同时减少对存量资本的

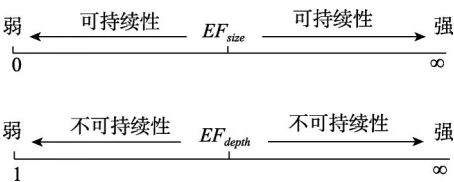


图2 足迹广度和足迹深度的物理意义及取值范围^[11]
Fig. 2 Physical meanings and value ranges of footprint size and footprint depth

消耗，即增加足迹广度并减少足迹深度（图2）。因此，基于可持续发展的观点，本研究默认各国间的足迹广度排序为由高到低，足迹深度排序为由低到高。

3 实证分析与比较

3.1 数据来源和研究区域

由GFN定期发布的全球国家足迹核算清单^[12]较为权威且相对完整，其最新的2010年版涵盖了2007年全球156个国家及全球的人均生态足迹和生物承载力数据。考虑到数据的

一致性与可比性，本研究基于该清单计算各国的足迹广度和足迹深度。研究区域选取美国、英国、法国、德国、意大利、加拿大、日本等7个主要发达国家（七国集团）和巴西、俄罗斯、印度、中国等4个发展中大国（基础四国）。

3.2 足迹广度国际比较

3.2.1 主要国家的足迹广度及其构成

足迹广度反映了区域自然资本的流动性强弱。11个主要国家及全球的人均足迹广度依次为：加拿大>俄罗斯>美国>巴西>法国>德国>全球>意大利>中国>英国>日本>印度（图3）。总的来看，国土辽阔、资源丰富的国家由于生物承载力强而具有较高的足迹广度；相反，人口密度大、资源禀赋少的国家，由于资本流动所限制较多，导致足迹广度普遍较低。例如，加拿大高达6.98 hm²，远远超过其他国家；其次是俄罗斯，为4.41 hm²；最低为印度，仅有0.49 hm²；次低为日本，为0.60 hm²。7个发达国家中半数以上高于1.71 hm²的全球人均足迹广度，发展中四国中俄罗斯和巴西处于这一行列。

从各国足迹广度的构成来看（图3、4），占据主要部分的多为林地或耕地。例如，加拿大和俄罗斯2个原油生产大国，70%以上的足迹广度来自林地，来自耕地的比例仅为20%左右；相反，印度近80%的足迹广度来自耕地，表明农业生产仍是该国最主要的自然资本利用方式。此外，日本和美国均有超过半数的足迹广度来自林地；而在英国和意大利，一半以上的足迹广度来自耕地，表明农作物生产在西欧工业化国家中仍占据重要的地位^[14]。草地在不同国家所占份额相差较大。例如，巴西近32%的足迹广度来自草地，远远超过全球12%的平均水平；而在日本和印度，这一比例分别仅为0.56%和0.74%，很可能与两国国民偏爱素食和海鲜胜过肉类有关。渔业用地的全球平均比例为6.36%，而海岛国家英国和日本均在13%左右，明显高于其他国家。建设用地比例高低与人口密度正相关。例如，英国约15%的足迹广度来自建设用地，印度和日本也约为10%，而加拿大和俄罗斯分别仅为0.69%和0.78%，远远低于3.74%的全球平均水平。

3.2.2 不同区域足迹广度的构成 足迹广度的构成在一定程度上反映了流量资本占用的区

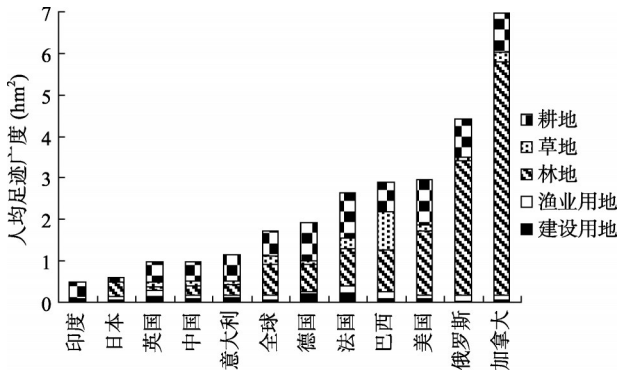


图3 主要国家人均足迹广度及其构成

Fig. 3 Footprint size per capita and its components in major countries

注：生态足迹理论基于碳排放零增长目标^[13]，将化石能源的生态占用水平用中和其碳排放所需的林地面积来表征。但现有GFN数据资料尚无法区分用于木材生产和用于碳中和的林地，故只能权且将化石能源用地并入林地一并计算。

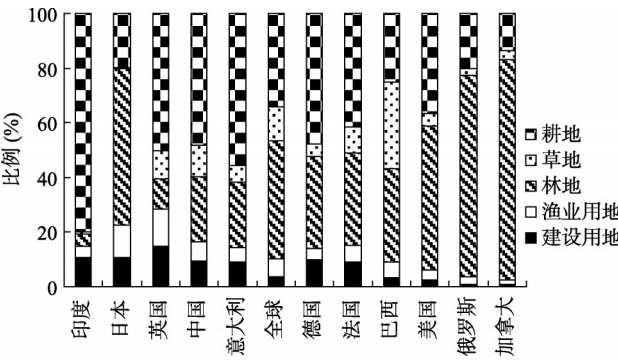


图4 主要国家人均足迹广度构成比例

Fig. 4 Proportions of footprint size per capita in major countries

域比较优势。7个发达国家一半以上的足迹广度来自林地（图5a），这其中绝大部分用于吸收化石能源燃烧所产生的CO₂，从一个侧面反映了西方高消费高耗能生活方式对自然资本流向的影响；欧美国家虽然粮食消费相对较少，但人均禽畜消费量和生物质能源消费量较高，对谷物间接需求较大，导致耕地份额位列第二，约占30%；草地和建设用地区第三，分别约占5%；渔业用地最低，仅占4%左右。4个发展中国家的林地、耕地和草地所占份额之比约为4:2:1（图5b），林地仍是足迹广度的主要部分，但比例有所下降；最低为建设用地，仅占3%，表明发展中国家城镇的流量资本利用水平总体较低。从全球范围来看（图5c），林地和耕地分别占44%和34%，是足迹广度主要的构成部分；草地、渔业用地和建设用地区分别占12%、6%和4%。

中国人均足迹广度的构成大小依次为：耕地>林地>草地>建设用地>渔业用地（图5d）。与其他国家及全球相比，中国的足迹广度具有如下特点：① 人均水平较低，仅为全球平均水平的1/2左右，比前两位的加拿大和俄罗斯分别少4.00和3.43 hm²，在11国中位列第八；② 分布较平均，5类土地所占比例均接近全球平均水平，是11国中少数几个没有最值（最大值、最小值）出现的国家之一；③ 耕地份额较高，相当于其他4类土地的总和，这一点无论与发达国家、发展中国家还是全球的平均水平均有很大差异；④ 林地份额较低，仅为全球平均水平的一半左右，表明人均林地资源禀赋与全球平均水平仍存在较大差距；⑤ 建设用地份额较高，是全球平均水平的2.5倍，这与中国过分追求城镇规模、流量资本明显向其倾斜有关。总之，农业仍是中国利用流量资本的优势性领域，但建设用地对资本流向的影响也不容忽视。

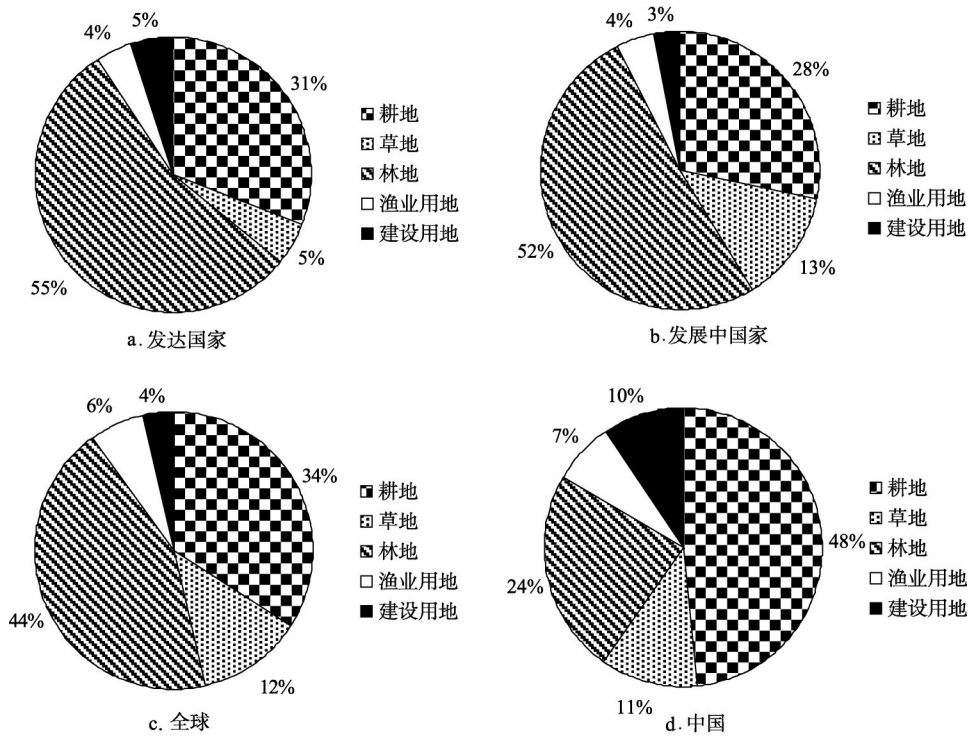


图5 全球不同区域人均足迹广度的构成

Fig. 5 Components of footprint size per capita in different global regions

3.3 足迹深度国际比较

3.3.1 主要国家的足迹深度 足迹深度反映了区域自然资本存量的消耗大小。11个主要国家及全球的足迹深度依次为：巴西=1<俄罗斯<加拿大<全球<法国<印度<中国<美国<德国<英国<意大利<日本（图6）。总的来看，资源富足型国家的足迹深度普遍较低，资源贫乏型国家则较高。例如，加拿大、巴西和俄罗斯，足迹深度均接近或为1，表明存量资本得到了较好的保护；相反，60%以上谷物和95%以上原油依赖进口的日本^[15]，足迹深度高达7.89，相当于需要近8倍的国土面积才能独立支撑其资源消费量。前面提到，足迹深度反映了资源消费和生态服务在不同时期的公平性差异，并且随着足迹深度的增加，存量资本消耗加快，还会反作用于生物承载力导致其下降。除加拿大外，其他6个发达国家的足迹深度均明显高于甚至数倍于1.55的全球平均水平。这足以表明，发达国家社会财富的增加，是以透支后代（特别是发展中国家后代）的自然资本享用权为代价的。

比较图3与图6，发现足迹深度与足迹广度在各国间基本呈逆向排列。可见，加拿大、俄罗斯等国之所以有很低的足迹深度，是因为供其占用的流量资本多。值得注意的是，美国、法国和德国的人均足迹广度和足迹深度均高于全球平均水平，表明其不仅大量占用流量资本，还严重消耗存量资本，人均自然资本利用量大大高于全球人均水平，明显有失公平。根据可持续发展的公平性原则^[16]，人类对全球的自然资源和生态服务拥有同等享用权，印度、日本、英国、中国和意大利等人均足迹广度低于全球平均水平的国家，应获得一定配额的资本流量补偿，若采用类似于“历史累积人均”这样的指标^[17]，印度和中国等发展中人口大国的配额还会大大提高。

3.3.2 主要国家足迹深度的构成 足迹深度的构成在一定程度上反映了生态盈余或生态赤字分布状况。如图6所示，3个足迹深度接近或为1的国家，其不同地类的足迹深度也均为1（加拿大的草地和俄罗斯的耕地除外），呈现出全面生态盈余的良好状态。林地是除日本外其他8个国家中足迹深度最高的地类，特别是英国、印度和意大利，其足迹深度分别高达32.24、19.70和11.56，相当于3国分别需要近33、20和12个现有林地，才能完全中和自身化石能源消费所排放的CO₂（不考虑木材生产）。渔业用地足迹深度在多数国家位列第二。例如，日本对海产品的需求很大，导致该值高达8.47，为11国中最高，但仍不及该国的草地和林地足迹深度。草地足迹深度在不同国家间差异较大。例如，有5个国

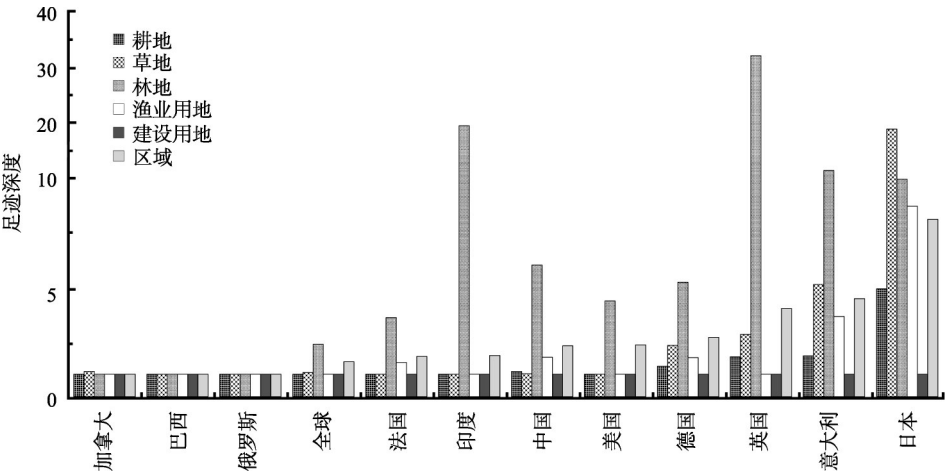


图6 主要国家足迹深度及其构成

Fig. 6 Footprint depth and its components in major countries

家为1，而日本则高达19.88，远远超过该国其他地类，这可能与其人均草地面积严重不足有关。建设用地足迹深度均为1，这是由于GFN默认建设用地的生态足迹与生物承载力始终相等，属于系统性的方法误差，不影响区域间的相对差别。但若对产量因子和均衡因子进行合理调整，则能更好地反映城镇建设对存量资本的消耗程度。从全球范围来看，尽管除林地外的地类均未出现生态赤字，但由于林地足迹深度高达2.33，导致全球平均足迹深度仍超过原长1，人类需要1.55个地球才能可持续地支撑自身的资源消费量。可见，化石能源碳排放是全球生态超载的主要驱动力。

中国足迹深度的构成大小依次为：林地>渔业用地>耕地>草地>建设用地（图6）。与其他国家及全球相比，中国的足迹深度具有如下特点：①总体较高，在11国中位列第六，高于1.55的全球平均水平，在4个发展中国家中仅次于印度；②分布明显不均，林地足迹深度不仅大大高于其他地类，甚至为区域足迹深度的2.6倍；③草地相对较低，是除建设用地外最低的地类，故草地可作为自然资本利用的优先方向。应该看到，中国的足迹深度明显高于全球平均水平，而人均GDP尚不及全球的一半，通过消耗存量资本来增加社会财富的潜力已非常有限，未来面临提高国民收入和控制生态赤字的双重挑战，压力和风险均大于一般国家。

3.4 模型优化前后结果比较

3.4.1 足迹广度 图7a为模型优化前后各国及全球的足迹广度比较。模型未优化时得到的主要国家及全球的人均足迹广度依次为：加拿大>俄罗斯>美国>法国>巴西>德国>全球>英国>意大利>中国>日本>印度。模型优化后，全球人均足迹广度从1.80 hm²减少到1.71 hm²，美国、英国、法国、加拿大和印度等5个国家也出现下降，分别减少了0.92、0.37、0.36、0.03和0.02 hm²，而其他6个国家未发生变化。总的来看，7个发达国家共减少了1.68 hm²，而4个发展中国家仅减少了0.02 hm²。值得注意的是，由于英国的足迹广度明显减少，导致中国从第九位上升到第八位。前面提到，足迹广度的减少对区域和全球的代内公平性不仅无益反而有害，故模型优化后，对部分国家特别是发达国家资源消费的代内公平性评估更为谨慎，而对中国等发展中国家的评估则相对乐观。

3.4.2 足迹深度 图7b为模型优化前后各国及全球的足迹深度比较。模型未优化时得到的主要国家及全球的足迹深度依次为：加拿大=巴西=俄罗斯=1<全球<法国<印度<美国<中国<德国<英国<意大利<日本。模型优化后，全球足迹深度从1.50增加到1.55，英国、美国、法国和印度等4个国家出现上升，分别增加了0.27、0.24、0.12和0.04，加拿大和俄

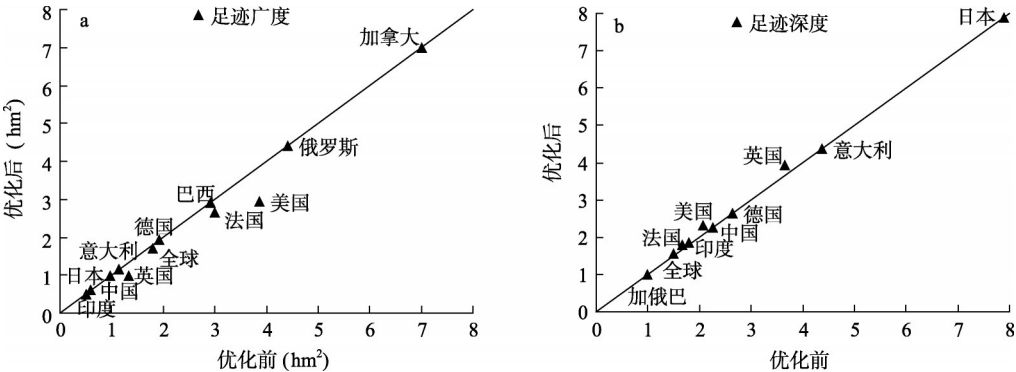


图7 模型优化前后的主要国家人均足迹广度和足迹深度比较

Fig. 7 Comparison of footprint size per capita and footprint depth before and after optimization

罗斯略有上升,而其他5个国家未发生变化。值得注意的是,中国的足迹深度一直稳定在2.26,而美国从2.07增加到2.31,取代中国位列第五。前面提到,足迹深度的增加对区域和全球的代际公平性会产生负面影响,故模型优化后,同样对部分国家的代际公平性评估也更为谨慎,而对中国等发展中国家则相对乐观。

3.4.3 差异原因分析 发生变化的美国、英国、法国、加拿大、俄罗斯和印度,在模型优化前均出现生态赤字和生态盈余被错误相抵的情况,而所有地类均为生态赤字或均为生态盈余的国家则不受影响。模型优化后,对流量资本和存量资本的区分和测度不再停留在区域层面,而是扩展到区域以下具体的生物生产性地类。这样一来,生态盈余既不能随时间逐年累积,也无法通过土地间的流动抵消生态赤字,这是以上6国产生结果差异的根本原因。可见,区域的足迹广度和足迹深度变化与其自身的生态赤字或生态盈余构成密切相关。一般而言,自然资本流动性较强、存量资本消耗较少且在不同地类间分布较为均匀的区域,发展的空间和潜力相对较大,因为可持续发展的目标是使生态足迹与生物承载力的构成变化基本一致^[18],不合理的构成比例将损害生态系统的多样性和生产力。

4 结论与讨论

(1) 为克服三维生态足迹模型在足迹广度和足迹深度计算方面的不足,通过区分和测度具体地类的流量资本和存量资本,推导出区域足迹广度和区域足迹深度的计算方法,并明确了两者的物理意义及取值范围。模型优化后,对美英等发达国家的代内和代际可持续性评估较为谨慎,而对中国等发展中国家则相对乐观,这更符合各国自然资本利用的实际,同时避免了可能存在的区域生态赤字低估。

(2) 足迹深度与足迹广度在各国间基本呈逆向排列:资源富足型国家可供占用的流量资本多,需要消耗的存量资本少,往往具有较高的足迹广度和较低的足迹深度;资源贫乏型国家则相反。发达国家的足迹深度显著高于全球平均水平,其财富积累以透支后代自然资本为代价。根据可持续发展的公平性原则,印度和中国等人均足迹广度较低的发展中国家应获得一定配额的资本流量补偿。

(3) 林地是多数国家特别是发达国家足迹广度和足迹深度构成的主要部分,耕地和渔业用地分别在足迹广度和足迹深度构成中位列第二,草地在不同国家所占份额相差较大,建设用地在足迹广度中的份额与人口密度正相关,在足迹深度中的大小恒定不变。化石能源碳排放是全球存量自然资本利用的主要方式和生态超载的主要驱动力,人类需要1.55个地球才能支撑其当前的资源消费量。

(4) 中国的人均足迹广度和人均GDP尚不及全球平均水平的一半,而足迹深度已高于全球水平,通过消耗存量资本增加社会财富的潜力已非常有限,未来必然面临增加国民收入和控制生态赤字的双重挑战。农业仍是中国流量资本利用的优势性领域,同时建设用地对资本流向也有一定影响。应将草地作为自然资本利用的优先方向,并适当控制城镇扩张速度。

(5) 维持自然资本存量恒定的“强可持续性”是人类社会可持续发展的基础。在生态赤字普遍存在的背景下,发展中国家应尽可能提高自然资本的流动性和收益率,减缓存量资本的消耗速度,努力消除资源环境瓶颈因素对经济发展的制约作用。发达国家应切实履行已承诺的国际义务,加快削减人均化石能源碳排放量,同时必须防止将这部分生态压力

转嫁给发展中国家。

近年来,模型改进与优化已成为生态足迹研究的重点方向。三维生态足迹模型首次从区分流量资本和存量资本的角度,提出了有别于生态足迹和生物承载力的两项新指标:从足迹广度(代内公平性)和足迹深度(代际公平性)两方面对区域自然资本的利用状况进行分解评估。为揭示自然资本存量与流量的内在关系,本文从更为细致的土地利用层面入手,对以上两项新增指标的计算方法作进一步优化,所得结果之所以发生一些变化,主要是源于对生态盈余与生态赤字的性质差异的明确辨析。这表明,关于自然资本利用的国际比较研究,需要结合各国的实际特点,着重分析生态赤字(或生态盈余)在结构、性质及产生原因等方面的差异,而不能仅仅根据生态足迹或生态赤字的绝对大小简单排序^[11]。当然,由于本研究仍以土地利用为限制性因子,也就无法避免生态足迹模型所面临的一个共性问题:未考虑某些地理环境要素差异(如水、热条件)对各地类生态服务功能和性状的影响^[19],所得结论可能与实际有一定出入。此外,基于历史累积人均的足迹广度配额分配或许可以作为国际环境谈判的重要依据,因而将是下一步的研究重点。

参考文献(References)

- [1] Daly H. Operationalizing sustainable development by investing in natural capital//Jansson A M, Hammer M, Folke C, et al. (eds.). Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainability. Washington: Island Press, 1994. 23-37.
- [2] Pearce D W, Turner R K. Economics of Natural Resources and the Environment. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1990. 44-44.
- [3] Daly H, Farley J. Ecological Economics: Principle and applications. Washington: Island Press, 2004. 29-36.
- [4] Farley J, Daly H. Natural capital: The limiting factor: A reply to Aroso, Blignaut, Milton and Clewell. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 6-10.
- [5] 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.
- [6] Rees W E. Ecological footprints and bio-capacity: Essential elements in sustainability assessment//Dewulf J, Van Langenhove H (eds.). Renewables-based Technology: Sustainability Assessment. Chichester: John Wiley and Sons, 2006. 143-158.
- [7] 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.
- [8] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography. Ecological Modelling, 2011, 222 (16): 2939-2944.
- [9] Hicks J R. Value and Capital: An Inquiry into Some Fundamental Principles of Economic Theory. Oxford: Clarendon Press, 1946. 1-352.
- [10] 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.
- [11] 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): 1995-2005.
- [12] Global Footprint Network. National footprint accounts 2010 edition.
http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/ecological_footprint_atlas_2008/. (2010-12-07)
- [13] Kitzes J, Moran D, Galli A, et al. Interpretation and application of the Ecological Footprint: A reply to Fiala (2008). Ecological Economics, 2009, 69(4): 929-930.
- [14] 张雷. 经济发展对碳排放的影响. 地理学报, 2003, 58(4): 629-637.
- [15] 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 (12F): 633-638.
- [16] 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2050 年大气 CO₂ 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.
- [17] 张志强, 曲建升, 曾静静. 温室气体排放评价指标及其定量分析. 地理学报, 2008, 63(7): 693-702.
- [18] 陈成忠, 林振山. 中国人均生态足迹和生物承载力构成的变动规律. 地理研究, 2009, 28(1): 129-142.

[19] 谢高地, 鲁春霞, 甄霖, 等. 区域空间功能分区的目标、进展与方法. 地理研究, 2009, 28 (3): 561-570.

International comparison of natural capital use: A three-dimensional model optimization of ecological footprint

FANG Kai¹, GAO Kai², LI Huancheng³

(1. Institute of Environmental Sciences (CML), Leiden University, Leiden 2333CC, South Holland, The Netherlands;

2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

3. Shenzhen Academy of Environmental Science, Shenzhen 518001, Guangdong, China)

Abstract: Humanity can be considered sustainable only if the natural capital stocks remain constant. The basic concepts and methodologies of a three-dimensional model of ecological footprint were introduced by this paper. Then much emphasis was put on the derivation and calculation of two indicators - regional footprint depth and regional footprint size so as to optimize the model. Taking this as the basis, an assessment and comparison of natural capital use in 11 major countries in 2007 were performed. Moreover, the fact was provided that results differed before and after optimization. The results demonstrated the following. First, the world-average appropriation of natural capital flows per capita was 1.71 ha, and more than one and a half planets were necessary to support the resource consumption of world's inhabitants. Fossil-fuel carbon emissions were the dominant pattern of natural capital use and the major driver of ecological overshoot on the globe. Second, the descending order of countries that occupy the capital flows was Canada, Russia, USA, Brazil, France, Germany, the world-average, Italy, China, UK, Japan and India. Conversely, the ascending order of countries that deplete capital stocks was Canada, Brazil, Russia (the three of them almost deplete nothing), the world-average, France, India, China, USA, Germany, UK, Italy and Japan. Third, some developed countries like the USA, France and Germany were obligated to pay compensation to developing countries, as the capital flows and stocks they used are both much more than the world average. Fourth, the world-average footprint size per capita decreased by 0.09 ha while the footprint depth increased by 0.05 comparing models with or without optimization. In particular, the optimized model offered a more conservative estimate on the sustainability of developed countries and thus a relatively optimistic estimate on that of developing countries. This was in accordance with the real situation of the natural capital use and ecological deficit in different countries. And the last, how to increase national income and control ecological deficit would be dual challenges for China. It is suggested that a priority for lands that support the use of natural capital should be given to grassland, and it is necessary to put constraint on the accelerating urban expansion.

Key words: natural capital; three-dimensional ecological footprint; footprint size; footprint depth; model optimization; international comparison