#### DOI: 10.5846/stxb201308022011

方恺.基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析——选取 11 个国家为数据源.生态学报,2015,35(11):3766-3777. Fang K.Assessing the natural capital use of eleven nations: an application of a revised three-dimensional model of ecological footprint.Acta Ecologica Sinica, 2015,35(11):3766-3777.

# 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析

——选取 11 个国家为数据源

# 方 恺\*

荷兰莱顿大学环境科学系, 莱顿 2333CC

摘要:自然资本利用评估是可持续发展量化领域的重要课题。生态足迹三维模型首次实现了流量资本与存量资本的分类测度, 为更全面、准确地反映人类利用自然资本的状况提供了可行的途径。从探讨模型缺陷入手,通过细致追踪各地类载体上的流 量资本与存量资本变化,克服了地类间赤字转移问题,明确了适用于区域尺度和地类尺度的足迹广度、足迹深度和三维足迹 等指标的计算方法。运用改进后的模型,分析了 1999—2008 年全球 11 个国家自然资本利用的时空变化特征。结果表明:在 过去 10 年自然资本利用的国际格局中,美国、法国和德国(后 6 年)为流量资本与存量资本双高型;印度(前 2 年)为双低型; 英国、德国(前 4 年)、意大利、日本、印度(后 8 年)和中国为流量资本低、存量资本高型;加拿大、巴西和俄罗斯为流量资本高、 存量资本低型。研究表明:各国的自然资本利用状况是自然资源禀赋与社会经济发展水平共同作用的结果,发达国家的自然 资本利用强度总体仍显著高于发展中国家;流量资本占用与存量资本消耗之间存在负相关性,资源富足型国家的人均区域足 迹广度一般较高,区域足迹深度相对较低,资源贫乏型国家则相反。针对研究存在的局限性提出了进一步改进的优先方向。 关键词:自然资本;生态足迹;三维模型;国际格局

# Assessing the natural capital use of eleven nations: an application of a revised three-dimensional model of ecological footprint

FANG Kai\*

Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden 2333 CC, Netherlands

**Abstract**: Over the past years a continuously expanding list of ecological indicators termed "footprint" has been introduced to the scientific community, with the aim of assisting policy makers in better understanding the pressures that humanity places upon our planet. Nowadays footprint-type indicators have grown in interest and popularity, and the sustainability issues they are addressing have been far beyond the original scope. The mathematics behind the criterion of strong sustainability, for instance, has been demonstrated from the perspective of ecological footprint. As a consequence, accounting for natural capital use becomes one of the most compelling topics in the fields of footprint analysis. A three-dimensional (3D) model of the ecological footprint has been developed for the measurement of the human-induced natural capital use. This model is unique from other ecological footprint models in the sense that it allows, for the first time, a simultaneous assessment of the flows and stocks of natural capital at the regional and land levels. This paper starts from the idea of operationalizing the 3D model in a more accurate and robust way. To that end, we critically review the classical version of the 3D model, and propose to prevent unintended deficit shifting by tracking the appropriation of the capital flows and the depletion of the capital stocks among diverse types of land use. Using a revised version of the 3D model, the natural

收稿日期:2013-08-02; 网络出版日期:2014-07-14

基金项目:国家公派留学基金项目(20113005)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fang@ cml.leidenuniv.nl

capital use for eleven nations throughout the world has been evaluated by means of three key indicators, namely the footprint size, the footprint depth, and the 3D footprint. It is indicated that over the past 10 years, a change has been witnessed with respect to international distribution of the appropriation of natural capital flows and of the depletion of natural capital stocks. In evaluating the spatial and temporal characteristics of natural capital use among these nations, four categories have been classified as follows: (1) double-high flows and stocks use category which is observed in US, France, and Germany (during the latter six years); (2) double-low flows and stocks use category observed only in India during the first two years; (3) the category with low flows appropriation and high stocks depletion observed in UK, Germany (during the first four years), Italy, Japan, India (during the latter eight years), and China; and (4) the category with high flows appropriation and low stocks depletion observed in Canada, Brazil, and Russia. Our findings suggest that the spatial distribution of national natural capital use is largely driven by not only natural resource endowment but also social and economic expansion. This is the reason why the intensity of natural capital use in developed nations in general is significantly higher than that in developing nations, even though the gap is narrowing. A negative correlation has been identified between the appropriation of flows and the depletion of stocks. More specifically, the resource-rich nations usually result in a high national footprint size per capita and a relatively low national footprint depth, while the resource-poor nations, on the contrary, have a low national footprint size per capita and a high national footprint depth. Our analysis implies that many industrial countries, in particular developing nations, follow the evolution process of natural capital use from low intensity to high intensity. The 3D ecological footprint model has the potential to uncover the link between human demand for natural capital and the process of national industrialization. Ultimately, this paper lays out some priorities for further improving natural capital assessment through the combination of footprint family and planetary boundaries under a multiregional input-output model.

Key Words: natural capital; ecological footprint; three-dimensional model; international distribution

自然资本利用评估始终是可持续发展量化领域的重要课题<sup>[1-2]</sup>。自然资本是生态系统所提供的自然资源与生态服务的总称,分为流量资本和存量资本两部分<sup>[3]</sup>。生态经济学界普遍将存量资本稳定与否作为可持续性的基本判据<sup>[4-5]</sup>。著名的生态足迹理论正是基于这一标准而建立的:采用生态足迹表征一定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,然后通过二者的相对大小来判断区域的自然资本利用是否可持续<sup>[6]</sup>,以便从整体上反映人类利用自然资本的状况。

然而,大量基于经典生态足迹模型(以下称为经典模型)的实证分析表明,全球多数国家或地区长期处 于生态赤字状态,自然资本日益成为制约社会可持续发展的关键性因子<sup>[2]</sup>。在这样的背景下,为更全面、准 确地反映自然资本特别是存量资本所面临的严峻形势,克服经典模型评估结果信息量不足、政策相关性较弱 的缺陷<sup>[7]</sup>,Niccolucci等<sup>[8-9]</sup>提出了"三维生态足迹"的概念,即通过足迹广度和足迹深度两项新指标,实现 对流量资本占用和存量资本消耗状况的分类表征。

国内方面,方恺等<sup>[10-12]</sup>介绍了生态足迹三维模型(以下称为现有三维模型)的研究成果,并在分析基本 原理、方法及特点的基础上,对其缺陷进行了初步改进;朱琳等<sup>[13]</sup>将该模型应用于资源枯竭型城市的可持续 发展评估,并与经典模型进行了对比分析。在以往研究的基础上,从若干关键性指标入手,进一步完善计算 方法、评估模型性能,并以1999—2008年11个国家的面板数据为样本,结合所改进的三维模型(以下称为改 进三维模型),分析和比较各国自然资本利用的时空变化特征,以期为深化可持续发展量化研究提供一些 参考。

# 1 方法与数据

#### 1.1 现有三维模型

现有三维模型在生态足迹、生物承载力和生态赤字等既有指标的基础上,分别引入足迹广度表征人类对

3768

流量资本的占用水平,足迹深度表征人类对存量资本的消耗程度。这两项指标的计算公式分别为[8-9]:

$$EF_{\text{size}} = BC , 0 < EF_{\text{size}} \leq EF$$
 (1)

$$EF_{\text{depth}} = 1 + \frac{ED}{BC} = 1 + \frac{EF - BC}{BC}, EF_{\text{depth}} \ge 1$$
 (2)

式中, *EF*<sub>size</sub>为足迹广度; *BC* 为生物承载力; *EF*<sub>depth</sub>为足迹深度(等于1时称为原长); *ED* 为生态赤字; *EF* 为生态足迹。

足迹广度与足迹深度分别可以视为三维足迹在空间截面和时间轴方向上的两个分量。因此,三维足迹 是表征体积的物理量(尽管其数值和单位在形式上仍与经典模型一致)<sup>[9]</sup>:

$$EF_{3D} = EF_{size} \times EF_{depth} , |EF_{3D}| = |EF_{classic}|$$
(3)

式中, $EF_{3D}$ 为基于现有三维模型的生态足迹; $EF_{elassie}$ 为基于经典模型的生态足迹。

1.2 改进三维模型

现有三维模型相较于经典模型具有显著优势:①明确将存量资本不减少作为可持续性判定的基本依据, 丰富了生态足迹理论的经济学内涵;②通过增维成为真正的时空模型,实现了对流量资本和存量资本的分 类测度,既关注土地资源的空间稀缺性(代内公平),又关注矿物资源的不可再生性(代际公平)。

但与此同时,现有三维模型由于忽视了生态赤字与生态盈余的自然资本性质差异,在区域尺度上会高 估足迹广度、低估足迹深度,实际上仅适用处于生态赤字的单一地类。为此推导出了针对区域尺度的足迹广 度和足迹深度计算公式<sup>[10,12]</sup>:

$$EF_{\text{size, region}} = \sum_{i=1}^{n} \min \{ EF_i, BC_i \}$$
(4)

$$EF_{depth, region} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} \max\{EF_i - BC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^{n} BC_i}$$
(5)

式中,  $EF_{\text{size, region}}$ 为区域足迹广度;  $EF_i$ 为第 i 地类的生态足迹;  $BC_i$ 为第 i 地类的生物承载力;  $EF_{\text{depth, region}}$ 为区域足迹深度。

套用式(3)的形式,区域尺度的三维足迹计算公式表示为:

$$EF_{3D, region} = EF_{size, region} \times EF_{depth, region}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \min\{EF_i, BC_i\} \times (1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} \max\{EF_i - BC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^{n} BC_i})$$
(6)

式中, *EF*<sub>3D,region</sub>为区域三维足迹(hm<sup>2</sup>)。在以往研究中认为区域三维足迹应大于等于区域足迹广度与区域足 迹深度的乘积<sup>[10]</sup>。本文对区域三维足迹的定义做了调整,以便使其与地类尺度的三维足迹计算原理相 一致。

相应地,足迹广度和足迹深度在地类尺度上的普适性计算公式应为:

$$EF_{\text{size},i} = \min\{EF_i, BC_i\}$$
(7)

$$EF_{depth,i} = 1 + \frac{\max\{EF_i - BC_i, 0\}}{BC_i}$$
(8)

式中,  $EF_{size_i}$ 为第 i 地类的足迹广度;  $EF_{death_i}$ 为第 i 地类的足迹深度。

1.3 改进前后指标比较

根据数学法则,下列不等式成立:

$$EF_{\text{size, region}} = \sum_{i=1}^{n} \min\{EF_i, BC_i\} \leqslant \sum_{i=1}^{n} BC_i = EF_{\text{size}}$$
(9)

$$EF_{\text{depth, region}} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} \max\{EF_i - BC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^{n} BC_i} \ge 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} (EF_i - BC_i)}{\sum_{i=1}^{n} BC_i} = EF_{\text{depth}}$$
(10)

可见,相较于现有三维模型,改进三维模型的区域足迹广度有所减少,而区域足迹深度有所增加。这是因为模型改进后,对流量资本与存量资本的区分和追踪不再局限于区域尺度,而是扩展到区域以下具体的生物生产性土地。这样一来,生态盈余既不能随时间逐年累积,也无法通过在地类载体间的流动抵消生态赤字<sup>[12]</sup>。此外,通过数学推导可证明,区域三维足迹(区域足迹广度与深度的乘积)的变化也是确定的,即较现有三维模型有所减少:

$$EF_{3D, region} = \sum_{i=1}^{n} \min\{EF_{i}, BC_{i}\} \times (1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} \max\{EF_{i} - BC_{i}, 0\}}{\sum_{i=1}^{n} BC_{i}})$$

$$\leq \sum_{i=1}^{n} BC_{i} \times (1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} ED_{i}}{\sum_{i=1}^{n} BC_{i}}) = EF_{classic} = EF_{3D}$$
(11)

从式(9)一(11)可知,改进三维模型一定程度上克服了现有三维模型及经典模型在自然资本评估方面 存在的看似矛盾的两个缺陷:①生态赤字存在转移风险,忽视存量资本稳定对维持地类乃至区域可持续性 的极端重要性<sup>[8,14]</sup>;②区域评估结果总体过于悲观,带有明显的生态偏向性<sup>[15-17]</sup>。

#### 1.4 研究区域与数据来源

本文选取美国、英国、法国、德国、意大利、加拿大和日本等7个发达国家和巴西、俄罗斯、印度和中国等4 个发展中国家作为研究区域。截至2009年,这11国的国土面积约占全球的44.8%,人口约占52.6%,GDP (以美元计)约占68.6%<sup>[18]</sup>。本研究的重点不在于改进生态足迹的计算方法,而是基于生态足迹和生物承载 力数据进一步计算并分析各国的足迹广度和足迹深度。根据世界自然基金会(WWF)、伦敦动物学学会 (ZSL)和全球足迹网络(GFN)等每2年发布一次的《地球生命力报告》(2002—2012)<sup>[19]</sup>,收集到1999、2001、 2003、2005、2008年11国的人均生态足迹和生物承载力面板数据(2010版报告由于不含详细数据而未予采 用),所有数据分别按耕地、草地、林地、渔业用地和建设用地等5类组分列出。鉴于地球碳循环存在不确定 性<sup>[20]</sup>,该面板数据未对用于木材生产和碳中和的林地生物承载力进行区分,为保持生态足迹与生物承载力 地类组分的一致性,本文权且将矿物资源用地并入林地计算。

# 2 结果与分析

#### 2.1 11 个国家的区域足迹广度

### 2.1.1 时间序列变化

区域足迹广度反映了一个区域的流量资本占用水平。对生态赤字的国家而言,人均区域足迹广度实际 上还反映了可再生资源(主要为生物资源)的丰裕度,可以作为衡量该国可再生资源禀赋的重要指标。 1999—2008年,全球人均区域足迹广度经历小幅波动,总体由1.75 hm<sup>2</sup>降至1.70 hm<sup>2</sup>(图1)。这11个国家 全球的人均区域足迹广度均有所改变,大致分为3类(图2):①显著上升型,包括中国、巴西、法国和德国, 年均分别增长了2.8%、2.4%、2.2%、1.2%;②基本稳定型,包括意大利、俄罗斯和全球,年均变化率不足 0.3%;③显著下降型,包括英国、印度、加拿大、美国和日本,年均分别减少了5.7%、4.0%、3.8%、2.9%、 2.2%。





1999—2008年,人均区域足迹广度排名前3位的 国家依次为:加拿大(6.24—8.85 hm<sup>2</sup>)、俄罗斯(3.73— 4.40 hm<sup>2</sup>)、美国(3.00—3.93 hm<sup>2</sup>);排名后3位的国家 均集中在亚洲:印度(0.37—0.67 hm<sup>2</sup>)、日本(0.58— 0.76 hm<sup>2</sup>)、中国(0.68—0.87 hm<sup>2</sup>)。以最高的加拿大 和最低的印度为例,2005年两国的人均区域足迹广度 相差18倍,而人口密度竟反向相差101倍<sup>[18]</sup>。因此, 人均区域足迹广度的国际差异一定程度上缘于土地资 源分布的严重不均。总的来看,地广人稀、资源富足的 国家,人均区域足迹广度相对较高;而人口稠密、资源 贫乏的国家则普遍较低,这也从侧面佐证了该指标的 资源禀赋指示作用。





#### 2.1.2 地类组分构成

通过对比不同年份人均区域足迹广度的地类组分构成,有助于分析各国流量资本占用的空间变化特征。 图 3显示了 1999 和 2008 年 11 个国家及全球的人均区域足迹广度构成。以全球为例,1999 年各地类组分占 比由高到低依次为:林地(49.1%)、耕地(30.3%)、渔业用地(8.0%)、草地(6.9%)、建设用地(5.7%);2008 年 变为:林地(44.7%)、耕地(33.5%)、草地(12.4%)、渔业用地(5.9%)、建设用地(3.5%)。可见,过去 10 a 林 地、渔业和建设用地占比小幅下降,耕地和草地占比小幅提高,草地取代渔业用地跃居第 3 位。

1999年6国的人均区域足迹广度首要组分为耕地,占比由高到低依次为:意大利(50.9%)、中国(48.5%)、法国(43.0%)、德国(40.0%)、美国(37.9%)、英国(33.5%);其他5国的首要组分为林地:加拿大(66.2%)、俄罗斯(63.2%)、印度(46.5%)、巴西(43.0%)、日本(39.4%)。2008年多数国家的首要组分未变,但美国由耕地变为林地,印度由林地变为耕地。美国的这一变化,可能与其近年来大力推行生物替代能源而导致耕地产量因子下降、自然资本流动性减弱有关;而印度则为应对人口持续增长而不得不将更多的流量资本投入粮食生产。

10年间发达国家(法国除外)的耕地与林地份额之和有明显提高,表明二者作为流量资本主要载体的地





位有所增强。其中,英国、日本和美国的增幅较大,增长了14—24个百分点;加拿大、美国和德国的占比较高,达84.1%—93.9%,而全球平均水平为78.2%。但该份额在巴西、印度和中国却有所下降,表明发展中国家的流量资本开始向畜牧业、渔业和建筑业倾斜,而这些也是工业化初期易被忽视的薄弱领域。此外,受自然环境和饮食习惯等因素的限制,草地在日本和印度的占比极低。

2.2 11 个国家的区域足迹深度

2.2.1 时间序列变化

区域足迹深度反映了一个区域的存量资本消耗程度。对于长期生态赤字的国家而言,该指标还能反映 存量资本累积负债对代际公平性的负面影响。1999—2008年,全球区域足迹深度由1.28递增至1.56,增长 了21.9%,即目前1.56个地球才能持续满足世界人口的资源消费需求(图4)。与人均区域足迹广度的变化 类似,11个国家及全球的区域足迹深度变化也可分为3类(图5):①显著上升型,包括印度、中国、全球、意 大利和英国,年均分别增长了5.4%、3.3%、2.2%、2.1%、1.7%;②基本稳定型,包括美国、加拿大、日本、巴西





11 期

http://www.ecologica.cn

3771

和俄罗斯,年均变化率在0.6%以内;③显著下降型,包括法国和德国,年均分别减少了1.9%、1.5%。

1999—2008年,发展中国家的区域足迹深度普遍 较低:巴西始终稳定在1,表明其各组分均未出现生态 赤字;俄罗斯在少数年份大于1;印度和中国尽管增幅 较大,但绝对值仍明显低于多数发达国家。除法国和 加拿大外,发达国家历年的区域足迹深度均大于2,特 别是日本更高达5.44—8.18,数倍于全球平均水平 (1.28—1.56)。这表明,相当一部分发达国家的社会财 富积累,是建立在透支存量资本的基础之上。因此, 区域足迹深度的国际差异既与各国的自然资源禀赋有 关,更与特定的社会经济发展水平密切相联。总的来 看,资源富足型或中、低发展水平的国家,区域足迹深 度相对较低;而资源贫乏型或高发展水平的国家,区 域足迹深度普遍较高。



图 5 1999—2008 年 11 个国家区域足迹深度的年均变化率 Fig. 5 The annual average change rate of the regional footprint depth for eleven nations from 1999 to 2008

# 2.2.2 地类组分构成

区域足迹深度的地类组分构成反映了各国生态赤字与生态盈余的空间分布特征。图 6 显示了 1999 和 2008 年 11 个国家及全球的各地类足迹深度。除加拿大、俄罗斯和巴西外,林地一直是各国足迹深度最高的 地类,1999 年排名前 3 位的国家依次为:英国(28.08)、日本(11.86)、意大利(8.66);2008 年变为:英国 (28.91)、印度(21.50)、意大利(9.50)。英国的林地足迹深度不仅远远高于发展中国家,也是其他发达国家 的数倍乃至数十倍。若假定木材生产与碳中和的林地生物承载力大致相等,则可得出矿物资源用地约占英 国林地足迹深度的 85%,表明矿物资源消费在存量资本消耗中占有相当大的份额,这主要是因为英国天然 的矿物资源基础和长期形成的工业生产方式,使其更偏爱煤炭类传统能源,能源多样性明显低于美国、法国 和德国等其他发达国家<sup>[21]</sup>。





值得注意的是,印度的林地足迹深度变化尤为剧烈,10 a 间增长了 15 倍,表明矿物资源消费导致印度 的存量资本迅速下降,而存量资本的减少又会对流量资本产生负面影响<sup>[10-11]</sup>,从而一定程度上削弱该国农 业投资的自然资本预期收益。鉴于印度的人均区域足迹广度和人均 GDP 在 11 国中均排名垫底,而区域足 迹深度增幅和人口密度又高居首位,可以预见在即将到来的大规模工业化进程中<sup>[22]</sup>,本国自然资本对社会 财富增加的贡献度将非常有限,资源承载压力会随着人口的继续膨胀而进一步凸显。

除林地外,其他的地类足迹深度也发生了一定变化,如1999年耕地和渔业足迹深度大于1的国家分别

有 5、7 个,2008 年变为 7、5 个,耕地取代渔业用地成为多数国家存量资本消耗的次要载体。这一方面是因为需要开垦更多的耕地来满足近 10 亿世界新增人口的粮食需求;另一方面是由于大规模的水产养殖提高了 渔业的初级生产力,从而降低了单位水产产出的存量资本消耗量。以德国和俄罗斯为例,1999 年渔业用地 是两国足迹深度最高的地类,但 2008 年该指标均已降至 1。

多数国家的建设用地足迹深度接近或等于 1, 是各地类中构成较低的组分。《地球生命力报告》<sup>[19]</sup>甚至 默认建设用地的生态足迹与生物承载力始终相等,从而导致 2008 年全球各国的建设用地足迹深度恒为 1, 这可能缘于 GFN 对该指标计算方法科学性的检讨。但诸多研究表明,任何大国在工业化发展的转型期,均 会由于城乡人口迁移和城市规模扩张而不可避免地经历一个快速城市化阶段,大量自然资本由传统农业生 产涌向基础设施建设<sup>[22]</sup>。因此,探索更合理、有效的建设用地足迹深度计算方法,对及时、准确地反映各国 特别是发展中国家的存量资本消耗特征具有重要意义<sup>[12]</sup>。

2.3 11 个国家的区域三维足迹

1999—2008年,全球人均区域三维足迹经历先降 后升的变化趋势,总体由 2.24 hm<sup>2</sup>增至 2.65 hm<sup>2</sup>,增长 了 18.2%(图 7)。有 6 国出现下降,降幅由高到低依次 为:英国(31.9%)、加拿大(28.6%)、美国(23.8%)、日 本(13.9%)、德国(3.1%)、俄罗斯(2.2%);5 国有所上 升,增幅依次为:中国(71.5%)、巴西(23.6%)、意大利 (18.3%)、印度(11.0%)、法国(2.4%)。即便如此,发 达国家的人均区域三维足迹仍远远高于多数发展中国 家,以 2008年为例,居前两位的国家为:加拿大(6.32 hm<sup>2</sup>)、美国(6.24 hm<sup>2</sup>);居后两位的国家为:中国(2.13 hm<sup>2</sup>)、印度(0.85 hm<sup>2</sup>)。



图 7 1999—2008 年 11 个国家的人均区域三维足迹变化 Fig. 7 The regional 3D footprint per capita for eleven nations from 1999 to 2008 按 2008 年人均区域三维足迹的大小对各国进行排列

2.4 各国自然资本利用的时空特征

2.4.1 流量资本占用与存量资本消耗的关系

不同国家在自然资源禀赋和社会经济发展方面存在巨大差异,即便是同一国家在不同的工业化阶段也 会呈现不同的特点。为揭示流量资本占用与存量资本消耗之间的关系,以人均区域足迹广度为横坐标、区域 足迹深度为纵坐标,分别对 11 国及全球进行时间序列分析(图 8)。1999—2008 年,各国的自然资本利用均 经历了不同程度的变化。多数发达国家呈现人均区域足迹广度下降、区域足迹深度有升有降的趋势,仅有美 国两项指标均递减;发展中国家的变化则更趋多样化:巴西的人均区域足迹广度上升,区域足迹深度未变; 俄罗斯的区域足迹深度减少,人均区域足迹广度基本稳定;印度的变化与多数发达国家类似;中国与美国相 反,是唯一两项指标均递增的国家。

由图 8 可知,各国及全球的流量资本占用与存量资本消耗之间呈现如下 4 类关系:①倒 U 型,包括美国、意大利和印度,特点是当人均区域足迹广度处于某一中间水平时,区域足迹深度达到最高;②N 型,包括英国、德国、日本和全球,特点是人均区域足迹广度与区域足迹深度呈现时而反向时而同向的交替变化;③线型,包括巴西和中国,特点是人均区域足迹广度与区域足迹深度始终同向变化;④剪刀差型,包括法国、加拿大和俄罗斯,特点是人均区域足迹广度与区域足迹深度因为相对趋势的突变而形成(半)封闭曲线。 2.4.2 自然资本利用的国际格局

二元变量的聚类除利用常规分析软件外,还可以根据变量之间的相互关系进行类型划分。陈明星等<sup>[23-24]</sup>基于后者提出了一种象限图聚类法,并成功运用于城市化率与人均 GDP 指标的省际和国际格局分析。本文采用该方法的"简化版"对 11 国流量资本占用与存量资本消耗的特征进行聚类分析,具体做法如下:以人均区域足迹广度和区域足迹深度为横、纵坐标,以 1999—2008 年的全球年均水平为样本中心点





(1.71, 1.38),构建流量资本占用—存量资本消耗平面直角坐标系,并将过去 10 年各国的 60 个样本点逐一标出(图 9)。严格来说,每一年份均对应独立的象限散点图。但是由于本文以人均区域足迹广度与区域足迹深度的全球均值为样本中心点,而这一均值在过去 10 年仅呈现轻微波动,可以近似视为定值,故这里统一采用图 9 进行分析。这样做的优点是既能同时反映 11 国的数据分布及变化趋势,又能避免因样本数据有限而影响类型识别的客观性。根据样本点所处象限的不同,将各国的自然资本利用状况聚为4类:①自然资本利用 I型,特点是流量资本占用与存量资本消耗呈现双高态势,包括美国、法国和德国(后 6 年);②自然资本利用 II型,特点是流量资本占用与存量资本消耗高,包括英国、德国(前 4 年)、意大利、日本、印度(后 8 年)和中国;③自然资本利用 II型,特点是流量资本占用与存量资本占用与存量资本消耗高,包括英国、德国(前 4 年)、意大利、日本、印度(后 8 年)和中国;③自然资本利用 II型,特点是流量资本占用高、存量资本消耗高,包括英国、德国(前 4 年)、意大利、日本、印度(后 8 年)和中国;④自然资本利用 II型,特点是流量资本占用高、存量资本消耗低,包括加拿大、巴西和俄罗斯。

上述聚类结果表明,自然资本利用的国际格局具有如下主要特征:

(1)一国所属的自然资本利用类型由其自然资源禀赋与社会经济水平共同决定。其中,流量自然资本的占用水平主要受可再生资源禀赋制约,而存量自然资本的消耗则更多地靠社会经济发展水平驱动。从流量资本与存量资本的结构配比来看,Ⅰ型要优于Ⅱ型,德国由Ⅱ型转变为Ⅰ型,表明流量资本的占用水平进一步提高,从而有助于其降低对存量资本的刚性需求,实现产业结构的优化升级;已属于Ⅰ型的法国也有着与德国类似的变化趋势;Ⅱ型国家中的英国和日本资源贫乏但发展水平较高,因而具有较低的人均区域足迹广度和很高的区域足迹深度;Ⅲ型国家具有非稳态的特点,唯一属于此类型的印度转变为Ⅱ型,表明流量

拿大、巴西和俄罗斯资源富足,因而具有较高的人均区 域足迹广度和较低的区域足迹深度。

(2)各国的流量资本占用与存量资本消耗之间存 在负相关性。多数国家处于关于样本中心对称的II、IV 象限,即一般流量资本较多的区域,往往对应较低的 存量资本消耗,反之亦然。总的来看,资源富足型国 家的自然资本利用强度并不比资源贫乏型国家低,加 拿大、巴西和俄罗斯的存量资本消耗之所以较少,主要 是因为供其占用的流量资本较多。而英国、日本、印度 和中国的流量资本远远低于全球平均水平,一定程度 加剧了其存量资本的减少趋势。其中,英国和日本主 要受岛国生态环境的天然限制;印度和中国则是由于 庞大的人口基数和资源依赖型经济的影响而导致人均 资源禀赋严重不足。

9 II I 8 7 b - 美国 **資**大利 俄罗斯 Regional footprint depth - 英国 加拿大 印度 6 ---- 法国 日本 中国 区域足迹深度 5 - 德国 - 巴西 全球 4 3 2 **D**-b<sub>6</sub> ---a9  $a_6$ IV 0 \_0 \_\_\_ 6 8 区域足迹广度 Regional footprint size/hm<sup>2</sup>

图 9 各国人均区域足迹广度与区域足迹深度变化的象限散点图 Fig.9 The quadrant scatter plots of the regional footprint size and depth for eleven nations

a<sub>1</sub>—a<sub>12</sub>分别为 1999 年美国、英国、法国、德国、意大利、加拿大、日本、巴西、俄罗斯、印度、中国和全球对应的点; b<sub>1</sub>—b12 分别为 2008 年这些国家对应的点

(3) 发达国家的自然资本利用强度显著高于发展

中国家,但差距有所缩小。10年间7个发达国家与4个发展中国家的平均人均区域足迹广度之比由1.44降至1.10,平均区域足迹深度之比由2.41降至1.99。这一方面是因为发展中国家民众生活水平有了普遍提高,对自然资本需求的扩大导致人均区域足迹广度和区域足迹深度均明显增加;另一方面,发达国家近年来不断向发展中国家转移资源集约型产业,从而使本国的自然资本利用强度相对下降<sup>[25]</sup>。可见,人类社会由土地资源和矿物资源双轮驱动的财富增值模式并未根本改变,发达国家的自然资本利用强度总体仍显著高于发展中国家,但差距有所缩小。

# 3 结论与讨论

3.1 结论

(1)过去10年,11个国家的自然资本利用状况可聚为4类,美国、法国和德国(后6年)属于流量资本与存量资本双高的Ⅰ型,英国、德国(前4年)、意大利、日本、印度(后8年)和中国属于流量资本低、存量资本高的Ⅱ型,印度(前2年)属于流量资本与存量资本双低的Ⅲ型,加拿大、巴西和俄罗斯属于流量资本高、存量资本低的Ⅳ型;

(2)自然资本利用状况是自然资源禀赋与社会经济发展水平等因素共同作用的结果,其中可再生资源禀赋主要制约流量资本的占用水平,社会经济发展水平更多影响存量资本的消耗程度;

(3)流量资本占用与存量资本消耗之间存在负相关性,资源富足型国家的人均区域足迹广度一般较高, 区域足迹深度相对较低,而资源贫乏型国家则相反;

(4)发达国家的自然资本利用强度总体显著高于发展中国家,但这一差距有所缩小。

3.2 讨论

土地是一种支撑人类社会经济活动的基本载体和维持可持续发展所必须的稀缺资源<sup>[26]</sup>,土地资本也是 最具空间表现力和权威性的自然资本要素<sup>[27]</sup>。从资本转换的角度来看,生态足迹方法的实质是将负载在不 同地类上的自然资本供需状况,通过生产力因子重新投影到地球表面成为确切的土地资本数量。这一类似 于映射的转换思想甚为精妙,堪称生态足迹理论的精髓所在。本文利用改进三维模型进一步提高了地表投 影过程的精确度:通过对自然资本和土地类型的双重划分,使流量资本和存量资本在各地类载体上的变化 过程清晰可见。按流量资本和存量资本划分自然资本类型具有明显的合理性,有助于揭示人类的自然资本 需求与国家的产业结构和工业化进程之间的内在关系,理由如下:①实践表明,随着经济发展水平的提高, 产业结构也进行相应的调整和升级,第一产业(农业,广义上包括农、林、牧、渔)产值占比逐渐下降,第二产 业(工业)产值占比先增加后减小,第三产业(服务业)产值占比逐渐上升<sup>[28]</sup>;②土地资源(流量资本)主要承 载农业的发展,矿物资源(存量资本)主要支撑工业的发展,自然资本与人力资本共同托起服务业的发 展<sup>[21]</sup>。这样一来,生态足迹三维模型不仅能用于分析各国在不同工业化阶段的自然资本利用特征,还可进 一步探索国家自然资本利用所遵循的演进路径和一般规律(图 10)。





同时必须指出,本研究的一些局限性尚待克服:①关注的自然资本类型有限,主要包括作为食物的可再 生生物资源和作为能源的不可再生矿物资源,未覆盖水资源等其他一些重要的自然资本类型。对此,可以 尝试将水足迹、碳足迹等其他足迹指标也一并纳入核算账户,从而形成较为完整的"足迹家族"整合框 架<sup>[29-30]</sup>;②考虑到足迹广度和足迹深度的计算还有赖于承载力指标,建议在足迹家族的基础上进一步引入 "行星边界"的概念<sup>[31]</sup>,以解决碳足迹等指标缺乏对应环境阈值的问题,从而为实现足迹广度和深度指标在 不同自然资本类型之间的横向比较提供理论依据;③目前采用的生态足迹基础数据由 GFN 通过国家足迹核 算方法得到,尽管有学者将其归为投入产出分析方法<sup>[32]</sup>,理由是 GFN 较为详尽地考虑了国际贸易和产业分 工合作过程中的自然资本流动与转移,但随着全球化进程的日益深入,生产地与消费地关系的复杂程度进 一步加剧,有必要借助高性能的跨区域投入产出模型才能更全面、细致地反映资源和服务的多重进出口关系 对国家自然资本利用的影响<sup>[33]</sup>。综上,今后国家尺度自然资本量化研究的优先方向是:以消费者负责和生 命周期观点相结合为原则,构建基于跨区域投入产出模型的足迹家族国际数据库,同时确定对应的行星边 界额度并按一定方法分配到各国,据此将各项足迹的广度和深度落实到具体的空间(国度)。

**致谢:**吉林大学环境与资源学院董德明教授帮助写作,特此致谢。

#### 参考文献(References):

- [1] Costanza R, Daly H E. Natural capital and sustainable development. Conservation Biology, 1992, 6(1): 37-46.
- [2] 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.
- [3] Daly H E. Operationalizing sustainable development by investing in natural capital // Jannson A M, Hammer M, Folke C, Costanza, eds. Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainability. Washington: Island Press, 1994: 23-37.
- [4] 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.

- [5] Pezzey J. Economic Analysis of Sustainable Growth and Sustainable Development. Washington D C: World Bank, 1990: 88-88.
- [6] 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.
- [7] van den Bergh J, Grazi F. On the policy relevance of ecological footprints. Environmental Science & Technology, 2010, 44(13): 4843-4844.
- [8] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, Wackernagel M, Marchettini N. How deep is the footprint? A 3D representation. Ecological Modelling, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [9] Niccolucci V, Galli A, Reed A, Neri E, Wackernagel M, Bastianoni S. Towards a 3D national ecological footprint geography. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [10] 方恺, Heijungs R. 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. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274.
- [12] 方恺, 高凯, 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(9): 1657-1667.
- [13] 朱琳, 卞正富, 赵华, 余健. 资源枯竭城市转型生态足迹分析——以徐州市贾汪区为例. 中国土地科学, 2013, 27(5): 78-84.
- [14] 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): 1842-1849.
- [15] 彭建,吴健生,蒋依依,叶敏婷.生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷.生态学报,2006,26(8):2716-2722.
- [16] Castellani V, Sala S. Ecological footprint and life cycle assessment in the sustainability assessment of tourism activities. Ecological Indicators, 2012, 16(S1): 135-147.
- [17] Fiala N. Measuring sustainability: Why the ecological footprint is bad economics and bad environmental science. Ecological Economics, 2008, 67 (4): 519-525.
- [18] 中华人民共和国国家统计局.国际统计年鉴 2011. 北京:中国统计出版社, 2011.
- [19] WWF, ZSL, GFN. Living Planet Report 2002-2012. [2012-08-15]. http://wwf.panda.org/about\_our\_earth/all\_publications/living\_planet\_ report/living\_planet\_report\_timeline/.
- [20] 方精云,朱江玲,王少鹏,岳超,沈海花.全球变暖、碳排放及不确定性.中国科学:地球科学,2011,41(10):1385-1395.
- [21] 张雷. 经济发展对碳排放的影响. 地理学报, 2003, 58(4): 629-637.
- [22] 丁仲礼,段晓男,葛全胜,张志强. 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.
- [23] 陈明星, 陆大道, 查良松. 中国城市化与经济发展水平关系的国际比较. 地理研究, 2009, 28(2): 464-474.
- [24] 陈明星, 陆大道, 刘慧. 中国城市化与经济发展水平关系的省际格局. 地理学报, 2010, 65(12): 1443-1453.
- [25] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Foran B, Lobefaro L, Geschke A. International trade drives biodiversity threats in developing nations. Nature, 2012, 486(7401): 109-112.
- [26] Hashimoto S, Fischer-Kowalski M, Suh S, Bai X. Greening growing giants: A major challenge of our planet. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(4): 459-466.
- [27] 张雷. 现代城镇化的资源环境基础. 自然资源学报, 2010, 25(4): 696-704.
- [28] 张志强,曾静静,曲建升.世界主要国家碳排放强度历史变化趋势及相关关系研究.地球科学进展, 2011, 26(8): 859-869.
- [29] Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum, S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. Ecological Indicators, 2012, 16: 100-112.
- [30] Fang K, Heijungs R, de Snoo G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family. Ecological Indicators, 2014, 36: 508-518.
- [31] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, De Wit C A, Hughes T, Van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B H, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. Nature, 2009, 461(7263): 472-475.
- [32] Kitzes J, Galli A, Bagliani M, Barrett J, Dige G, Ede S, Erb K, Giljum S, Haberl H, Hails C, Jolia-Ferrier L, Jungwirth S, Lenzen M, Lewis K, Loh J, Marchettini N, Messinger H, Milne K, Moles R, Monfreda C, Moran D, Nakano K, Pyhälä A, Rees W, Simmons C, Wackernagel M, Wada Y, Walsh C, Wiedmann T. A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1991-2007.
- [33] Galli A, Weinzettel J, Cranston G, Ercin E. A footprint family extended MRIO model to support Europe's transition to a one planet economy. Science of the Total Environment, 2013, 461-462: 813-818.