

基于三维生态足迹的中国自然资本利用 时空演变及驱动力分析

郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷

(辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:目前基于三维生态足迹的中国省际自然资本利用研究, 仅从生产视角测度评价了区域自然资本存量、流量利用的空间格局。本文以消费视角对2006-2015年中国30个省(市、自治区)及不同地类足迹深度、足迹广度进行动态评估, 进而通过存量流量利用比和资本流量占用率刻画了中国自然资本利用可持续性现状, 并利用全局和局部回归模型量化其驱动因素及因素效应的空间差异性。结果显示: ①中国足迹深度从3.04升至4.17又降至4.06, 存量资本消耗有减弱趋势; 足迹深度大致表现为: 东部>中部>西部, 其中上海最高达30.69, 青海最低为1.70; ②中国足迹广度在0.36~0.39 ghm²/人之间波动; 足迹广度总体表现为: 西部>中部>东部, 其中最大值为新疆0.81 ghm²/人, 最小值为上海0.09 ghm²/人; ③从组分构成看, 化石能源用地和草地是存量资本消耗的主要方式, 耕地和建设用地是流量资本占用的主要方式; ④中国自然资本利用可持续性呈现变好趋势, 省际呈东弱西强的格局; 通过回归分析发现, 生态足迹强度、城市化率、生态承载力是导致自然资本利用可持续性空间差异的显著因素, 且这些因素的效应特征表现出不同的空间模式。生产视角和消费视角的测算结果相结合, 可提供全面丰富的生态足迹信息, 为相关实际应用提供一定的借鉴。

关键词: 三维生态足迹; 自然资本; 可持续性; 最小二乘法; 地理加权回归; 时空演变; 中国

1 引言

自然资本可为人类提供资源流和生态系统服务, 是人类生存与发展所必需的物质基础(徐中民等, 2006)。近年来, 伴随中国城市化和工业化的快速推进, 耕地、林地、草地等自然资本不断收缩, 加之消费需求不断扩大, 导致生态供需矛盾加剧。如何优化土地资源利用, 保持并提高生态供给, 实现绿色生产和消费, 减少生态占用已成为亟待解决的热点问题。当前中国自然资本的消耗速度超过其再生速度, 自然资本的不断减少已成为经济社会发展的障碍(Daly et al, 2004; Mancini et al, 2017)。因此, 明确区域自然资本流量和存量的利用情况及合理规划、管理自然资本对于区域可持续发展有重要的指导意义。

为定量评估自然资本利用程度和可持续性状况, Rees(1992)从生态角度出发, 将人类自然资源消耗折算成生态生产性土地面积, 提出生态足迹概念; Wackernagel等(1996)将此概念进一步完善提出生态足迹模型。这些传统的生态足迹模型仅关注生态赤字情况, 未考虑自然资本存量, 因此Niccolucci等(2009)提出三维生态足迹概念, 并引入足迹深度和足迹广度分别核算存量资本消耗和流量资本占用(Niccolucci et al, 2011)。方恺、Heijungs Reinout(2012)将三维生态足迹概念引入国内并进行了优化改进。近年来, 国内生态足迹相关研究逐渐由传统二维模型向三维模型转化, 方恺、李焕承(2012)基于改进的三维模型从生产角度分析了2008年中国自然资本利用的省际格局, 并在全国(方恺, 2013)及全球尺度上(方恺等, 2013; 方恺, 2014, 2015)分析

收稿日期: 2018-04-20; 修订日期: 2018-06-14。

基金项目: 国家社会科学基金项目(17BJL105) [Foundation: National Social Science Foundation of China, No. 17BJL105]。

作者简介: 郑德凤(1970-), 女, 黑龙江伊春人, 博士, 副教授, 主要从事资源评价与管理、生态经济评价研究, E-mail: defeng-zheng@lnnu.edu.cn。

引用格式: 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 等. 2018. 基于三维生态足迹的中国自然资本利用时空演变及驱动力分析[J]. 地理科学进展, 37(10): 1328-1339. [Zheng D F, Liu X X, Wang Y Y, et al. 2018. Spatiotemporal evolution and driving forces of natural capital utilization in China based on three-dimensional ecological footprint[J]. Progress in Geography, 37(10): 1328-1339.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.10.003

了自然资本利用的变化特征;杜悦悦等(2016)、张星星等(2017)从城市群尺度分别研究了京津冀、珠三角地区自然资本利用可持续状况并探究其影响因素;靳相木等(2017)基于扩展的三维生态足迹模型,构建土地承载力评价指数,以温州市为例判断了市域土地是否超载及超载程度;马维兢等(2017)从流域尺度核算分析了2000-2015年九龙江流域不同地类及区域自然资本利用情况;孙才志等(2017)借鉴三维生态足迹模型,对水资源存量和流量资本进行区分,测算分析了中国大陆31个省区水生态足迹广度和深度。

目前,基于生态足迹广度和深度的中国自然资本利用研究,特别是消费视角下省际层面自然资本存量、流量的测度及动态评估还较为少见,且对不同地类自然资本利用情况缺乏深入研究,对自然资本省际格局形成的驱动力探讨也亟待深入。鉴于此,本文以2006-2015年中国30个省级行政区(未包括西藏、香港、澳门、台湾)的消费账户为数据源,核算了各区域及各地类的自然资本利用状况,定量分析了自然资本利用可持续性的影响因素和影响程度的空间差异,并与生产性的自然资本利用结果进行了对比,生产视角和消费视角的测算结果相结合,可提供全面丰富的生态足迹信息,以期为实现“高经济水平,高自然资本存量”的可持续发展状态提供依据,为消费模式的选择及推动生态文明建设提供参考与借鉴。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 三维生态足迹模型及相关指标计算

(1) 三维生态足迹模型

三维生态足迹基于传统的二维生态足迹模型,引入了足迹深度和足迹广度,分别用来度量存量资本消耗和流量资本占用。足迹广度指在生态承载力范围内所占用的实际生态生产性土地面积,与区域资源禀赋条件密切相关,具有空间属性,强调代内公平(方恺, 2013)。足迹深度指为满足区域消费需求理论上需要占用自身土地面积的倍数,或再生出1年的区域资源消费量所需要的年数,具有时间属性,强调代际公平(方恺, 2013)。

在区域整体生态赤字的背景下,应减少足迹深度,扩大足迹广度,以最大限度地维持自然资本可

持续利用。足迹深度和足迹广度具体计算公式(Niccolucci et al, 2009)如下:

$$EF_{\text{depth}} = 1 + \frac{ED}{BC} = 1 + \frac{\max(EF - BC, 0)}{BC} \quad (1)$$

$$EF_{\text{size}} = \min(EF, BC) \quad (2)$$

式中: EF_{depth} 为足迹深度(无量纲); EF 、 BC 、 ED 分别为二维生态足迹模型中的生态足迹、生态承载力和生态赤字, BC 为扣除 12% 生物多样性保护面积所得。当 $EF \leq BC$, $EF_{\text{depth}} = 1$; 当 $EF > BC$, $EF_{\text{depth}} > 1$, 1 为足迹深度的自然原长。 EF_{size} 为足迹广度(ghm^2), $0 < EF_{\text{size}} \leq BC$ 。

足迹深度和足迹广度计算公式仅适用于单一地类的核算,若应用于多个地类或区域层面时,足迹深度有被低估的可能,足迹广度有被高估的可能。因此,方恺、Heijungs Reinout(2012)针对此问题对算法作了改进,由不同地类三维生态足迹指标得到区域水平的三维生态足迹,计算公式为:

$$EF_{\text{depth, region}} = 1 + \frac{\sum_i^n \max(EF_i - BC_i, 0)}{\sum_i^n BC_i} \quad (3)$$

$$EF_{\text{size, region}} = \sum_i^n \min(EF_i, BC_i) \quad (4)$$

式中: $EF_{\text{depth, region}}$ 为区域足迹深度(无量纲); EF_i 、 BC_i 分别为第 i 种地类的生态足迹、生态承载力; $EF_{\text{size, region}}$ 为区域足迹广度(ghm^2)。

(2) 资本流量占用率

当区域某一地类资本流量未被完全占用,该地类足迹深度为自然原长 1,无法表征人口对资本流量的实际占用,因此引入资本流量占用率(OR_{flow})指标进行表征(方恺, 2013),计算公式为:

$$OR_{\text{flow}} = \frac{EF_{\text{size, region}}}{BC} \times 100\% \quad (5)$$

(3) 存量流量利用比

存量流量利用比($R_{\text{flow}}^{\text{stock}}$)表征存量与流量之间的大小关系,可定量测算存量资本超前于流量资本的程度,其值越大,自然资本利用可持续性越弱(方恺, 2013),计算公式为:

$$R_{\text{flow}}^{\text{stock}} = \frac{EF - EF_{\text{size, region}}}{EF_{\text{size, region}}} = \frac{ED}{BC} = EF_{\text{depth, region}} - 1 \quad (6)$$

2.1.2 地理加权回归模型

中国自然资本利用可持续性受自然条件和人文因素的多重影响,而自然和人文因素存在空间异质性。地理加权回归模型(Geographical Weighted Regression, GWR)可有效地探测自然和人文因素在不同地理位置的空间非平稳性(Fotheringham et al,

2002; 孙克等, 2016), 是一种局部空间回归模型, 计算结果为局部参数估计。因此, 在全局回归的基础上进行局部空间回归, 可更好地揭示自然资本利用可持续性的影响因素。GWR模型的具体表达式为

$$y_i = b_0(u_i, v_i) + \sum_n b_n(u_i, v_i)x_{in} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中: y_i 为第 i 个样本点因变量值; (u_i, v_i) 为第 i 个样本点的地理坐标; $b_0(u_i, v_i)$ 为常数项的位置函数; n 为自变量个数; x_{in} 为第 i 个样本点第 n 个自变量的值; $b_n(u_i, v_i)$ 为自变量系数的位置函数; ε_i 为随机误差项。

自然资本利用可持续性可用存量流量利用比来衡量, 其影响因素的选取聚焦在人口、经济社会发展、居民消费、资源禀赋、技术水平和政策等 6 个准则。本文拟选取以下指标:

(1) 人口、经济社会发展和居民消费指标。人是环境压力的制造者, 这就决定了人口因素是自然资本利用的主导因素, 故采用常住人口数刻画人口对自然资本的压力。随着经济社会发展、居民消费水平提高, 对自然资本的索取不断增大, 从而引起生态压力加剧, 选取人均 GDP、城市化率反映社会富裕度和城市化进程对自然资本利用的影响; 另外考虑到工业是能源消耗最大的部门, 选取了第二产业比重作为结构化指标; 采用城镇居民人均消费支出、农村居民人均消费支出衡量居民消费水平。

(2) 资源禀赋、技术水平和政策指标。土地资源禀赋与自然资本的利用方式关联, 且区域资源供给能力越大, 生态可持续性越强, 本文选用生态承载力衡量区域资源禀赋条件。技术进步是适应和缓解生态压力的重要途径之一, 现有研究多采用科技经费支出占财政支出的比重、专利授权数、科技

人员数等指标衡量技术水平, 但这些指标并非全部与自然资本利用直接相关, 而本文选用的生态足迹强度能较好地反映区域自然资本利用技术水平; 政策因素对保障自然资本利用可持续性有重要作用, 故本文选用生态足迹强度和资本存量来衡量技术水平和政策倾向。

2.2 数据来源

本文采用国家生态足迹账户方法计算消费性二维生态足迹, 其中生物资源账户和化石能源账户所选取的指标以及数据来源见表 1, 这些指标的选取和划分标准及所对应的全球平均产量参照谢鸿宇(2008)的研究成果, 需要说明的是生物资源账户中的畜产品按其饲料来源分别归入相对应的土地类型。此外, 均衡因子采用全球足迹网络(Global Footprint Network, GFN)提供的 2018 版最新数据(Lin et al, 2018)。限于数据可得性, 本文研究对象未包含西藏、香港、澳门、台湾等 4 个省级行政区。

3 中国三维生态足迹测度与分析

3.1 时序变化分析

基于式(3)-(4)及有关数据计算中国 2006-2015 年的生态足迹、生态承载力、生态赤字、足迹深度和足迹广度, 结果见图 1-2。

图 1 显示, 2006-2015 年中国自然资本供给能力(生态承载力)从 0.826 ghm²/人降至 0.800 ghm²/人; 2006-2013 年资源消费需求(生态足迹)从 1.85 ghm²/人持续上升至 2.64 ghm²/人, 到 2015 年降至 2.53 ghm²/人; 自然资本亏损(生态赤字)2013 年达最

表 1 数据来源及说明
Tab.1 Indicators and data sources and instruction

项 目	指标选取	数据来源
生物资源账户	耕地: 粮食、食用油、蔬菜、猪肉、禽类、禽蛋、牛肉、羊肉、牛奶 草地: 牛肉、羊肉、牛奶 林地: 干鲜瓜果、木材 水域: 水产品	中国统计年鉴、中国各省统计年鉴(2007-2016)
化石能源账户	能源: 煤炭、原油、天然气、水电	中国能源统计年鉴(2007-2016)
土地数据	土地利用面积	中国统计年鉴(2007-2016)、自然资源部土地利用数据(2009-2015)
均衡因子	耕地(2.52)、草地(0.46)、林地(1.29)、水域(0.37)、化石能源用地(1.29)、建设用地(2.52)	Global Footprint Network. National Footprint Accounts (Lin et al, 2018)
产量因子	耕地(1.74)、草地(0.51)、林地(0.86)、水域(0.74)、化石能源用地(0)、建设用地(1.74)	《基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算》(刘承等, 2010)
人口数据	常住人口数	中国统计年鉴(2007-2016)

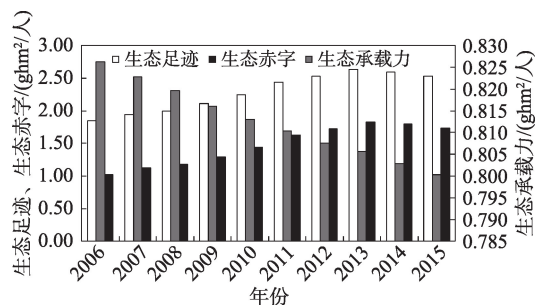


图1 2006-2015年中国生态供需情况

Fig.1 Ecological footprint, carrying capacity, and deficit in China, 2006-2015

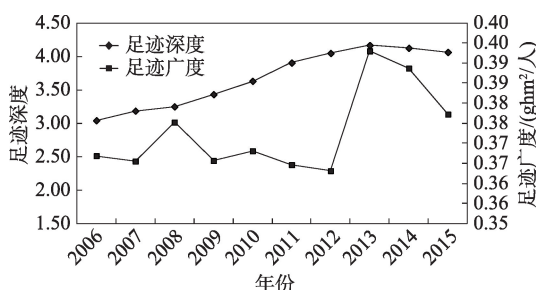


图2 2006-2015年中国足迹深度和足迹广度

Fig.2 Ecological footprint depth and size in China, 2006-2015

大值 $1.83 \text{ ghm}^2/\text{人}$, 2015 年降至 $1.73 \text{ ghm}^2/\text{人}$ 。

由图2可知,2006-2015年中国足迹深度呈先增长后下降的趋势。2013年之前中国足迹深度始终呈上升趋势,从3.04升至4.17,表明居民消费需求引起的生态压力持续增大;2013年之后足迹深度呈下降趋势,2015年降至4.06。足迹深度下降的原因在于党的“十八大”以来,着力推进绿色发展、低碳发展,生态文明建设初见成效,自然资本存量消耗持续增加的趋势得到遏制。足迹广度呈波动变化趋势,数值介于 $0.363\sim 0.393 \text{ ghm}^2/\text{人}$, 2013年达到顶峰,随后呈下降趋势。足迹广度受生态供给和生态需求的综合影响,若某一地类出现生态赤字,则足迹广度不与此类土地的生态需求有关,而与相对应的生态供给关联,由于10年间中国各地类生态供需情况的变化趋势不尽相同,导致了自然资本流量占用水平呈现不规则变动。在研究期内,足迹深度与生态足迹、生态赤字的变化趋势表现出高度的一致性。

3.2 空间格局分析

3.2.1 中国足迹深度空间格局分析

通过自然断点法对足迹深度进行梯度划分并保证不同时间节点分类标准一致(图3),以对足迹深

度进行时空格局分析,本文将足迹深度分为低、较低、中等、较高、高5个梯度,其中低和较低界定为低值区,中等界定为中值区,较高和高界定为高值区。

由图3d可知,2006-2015年中国30个省区足迹深度均大于1,其中上海平均足迹深度达30.69,需要30倍于自身的土地面积才能独立支撑其资源消费水平,存量资本消耗高;北京(11.59)、天津(13.79)、山西(9.01),存量资本消耗也较高;辽宁、河北等7个东部沿海省份及河南、宁夏的足迹深度4.32~8.10,存量资本消耗中等;新疆、内蒙古、陕西等7个西部省区和湖北、湖南等5个中部省区及海南足迹深度2.34~4.32,存量资本消耗较低;青海、四川等3个西部省区和黑龙江足迹深度低于2.34,存量资本消耗低。整体来看,足迹深度高值区主要分布在东部省区,低值区主要分布在中部和西部,东中西分异显著。

从图3a-3c可以看出,在研究期内中国30个省区足迹深度的梯度类型除个别省区有变动外,其余省区基本保持一致。足迹深度低的省区明显减少,从初期的10个省区减少至末期的4个省区;较低、中等和较高省区显著增加;变动情况具体为新疆、甘肃、吉林等从低向较低演变,陕西、河南、福建等从较低向中等演变,山西、宁夏、江苏、山东从中等向较高演变。2006-2011年中国各地区足迹深度值整体提高,与2011年相比,2015年足迹深度在低值区整体升高,在高值区尤其是上海、北京、天津有所降低。研究末期与初期相比,各省区足迹深度的变化量不尽相同,北京、上海分别降低1.27、0.13,其余省市提高0.03(云南)~4.69(宁夏)不等。

3.2.2 中国足迹广度空间格局分析

同样采用自然断点法对中国30个省区足迹广度的空间分布情况进行了梯度划分,结果见图4。

从图4d可以看出,2006-2015年流量资本占用高值区主要分布在西部的新疆、内蒙古、青海、甘肃、广西和吉林、黑龙江、海南、福建,足迹广度 $0.385\sim 0.843 \text{ ghm}^2/\text{人}$,这9个省区的足迹广度占全国总足迹广度的44.5%;流量资本占用低值区分布在资源禀赋较差、人口密度大的东部沿海省区(辽宁、福建、海南除外)以及可更新资源需求较低的陕西、山西等地,足迹广度 $0.082\sim 0.290 \text{ ghm}^2/\text{人}$,其中上海、北京足迹广度最低,分别仅为 $0.089 \text{ ghm}^2/\text{人}$ 、 $0.131 \text{ ghm}^2/\text{人}$;其余省区流量资本占用界定为中值区,足迹广度为 $0.290\sim 0.385 \text{ ghm}^2/\text{人}$ 。整体来看,中国省

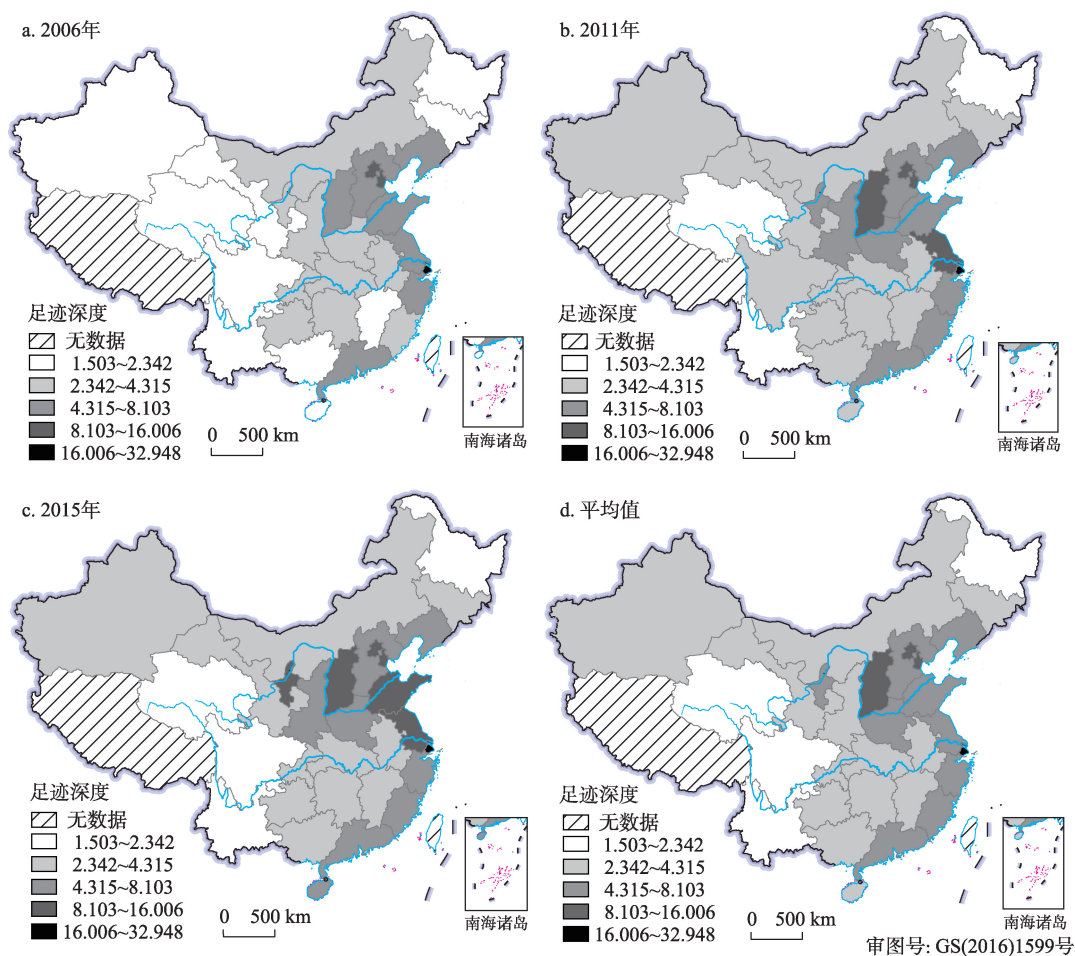


图3 中国足迹深度空间格局

Fig.3 Spatial patterns of provincial ecological footprint depth of China

际足迹广度大致呈西部>中部>东部的空间分布格局。

图4a-4c显示,足迹广度的空间分布格局在不同时间节点差异较小,足迹广度较高省区明显减少。空间格局变动情况具体表现为:甘肃、黑龙江、湖南、福建等从较高向中等演变,贵州从较低向中等演变,山东从中等向较低演变。10年间各省区足迹广度值呈现不规则变动,低等和较高等区如北京、上海、黑龙江、吉林足迹广度值下降;高等和较低等区如新疆、河南、山西足迹广度值波动变化;中等区如四川、云南足迹广度值升高。研究末期与初期相比,广西、青海、四川等16个省市足迹广度升高 $0.001\sim 0.176\text{ ghm}^2/\text{人}$,上海、浙江、北京等14个省市降低 $0.001\sim 0.087\text{ ghm}^2/\text{人}$ 。

3.3 组分分析

利用式(3)-(4)计算中国30个省区不同地类的足迹深度和5种地类(耕地、草地、林地、水域、建设

用地)的足迹广度及各组分占比(图5-6)。限于篇幅,文中仅列出2006、2015年的数据进行分析。需要说明的是,化石能源用地并没有专门的承载力,考虑到森林是主要的碳汇用地,和部分研究一样(马维兢等,2017),本文用林地代替;但关于足迹广度的计算,为避免重复,未纳入核算项目。建设用地的生态足迹与生态承载力作等同处理,其足迹深度始终为1。

各地类足迹深度的计算结果显示,能源足迹深度高值区与区域足迹深度高值区相对应,可见化石能源消费情况与自然资本存量的利用程度相关性高;2015年与2006年相比,仅上海和北京的能源足迹深度有所降低。草地是区域足迹深度的第二大组分,由于肉类农产品消费需求与草地资源供给空间分布不相匹配,导致全国大多省区(除内蒙古、青海)透支草地资本存量来满足城乡居民对畜牧产品的需求,尤其是草地资源较少的区域,草地存量消耗明

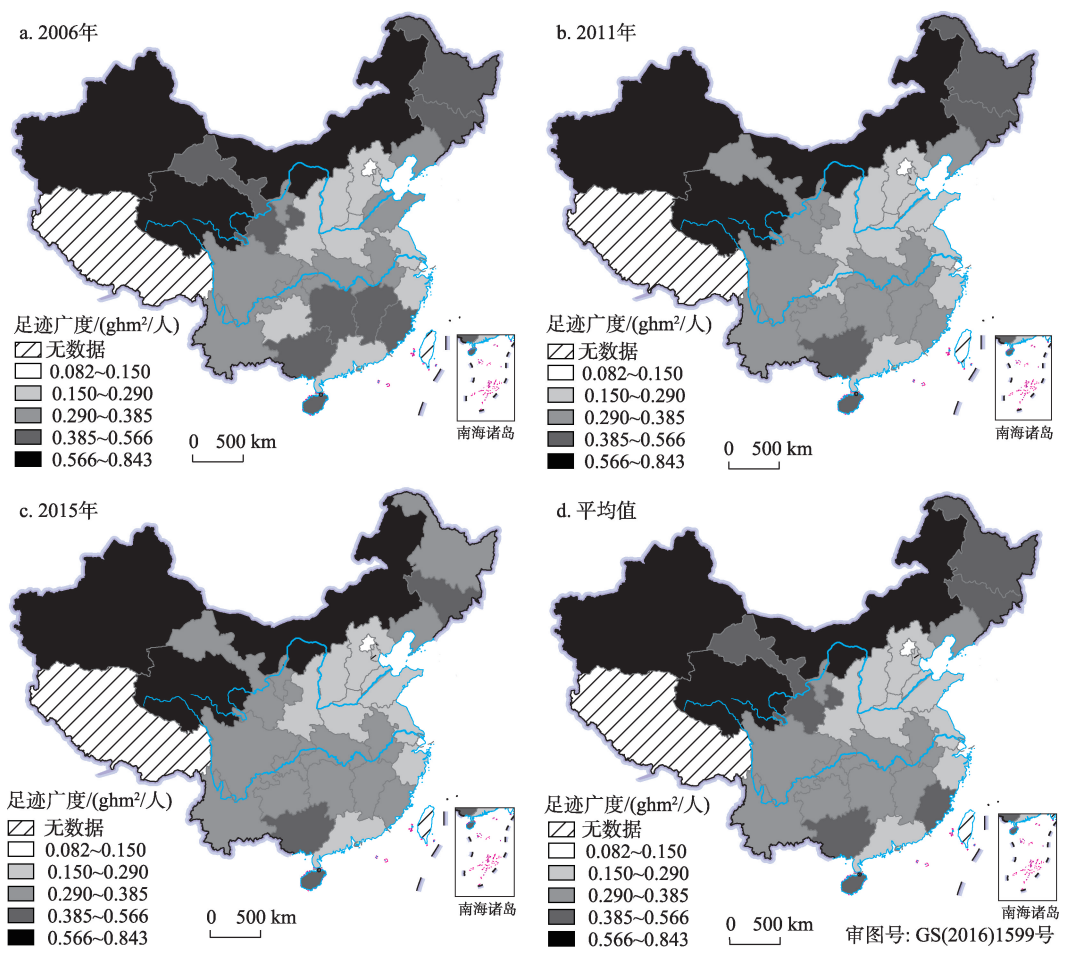


图4 中国足迹广度空间格局
Fig.4 Spatial patterns of provincial ecological footprint size of China

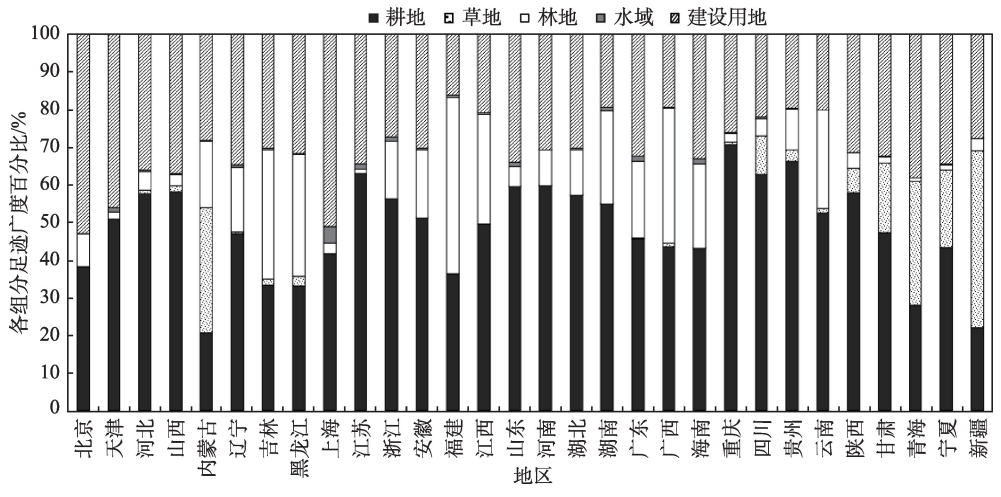


图5 2006年中国省际不同地类的足迹广度与组分占比
Fig.5 Percentage of ecological footprint size of different lands in 30 provinces (municipalities, autonomous regions) of China, 2006

显高于资源禀赋条件好的区域。此外,随着蛋、奶、肉类农产品需求进一步增大,草地资本存量消耗呈现只增不减的趋势。耕地启用存量资本的省区有北京、天津、上海、浙江、福建、广东,且在研究末期比研究初期消耗程度更大,其余省区均未透支耕地资本存量。水域足迹深度超过自然原长1的区域主

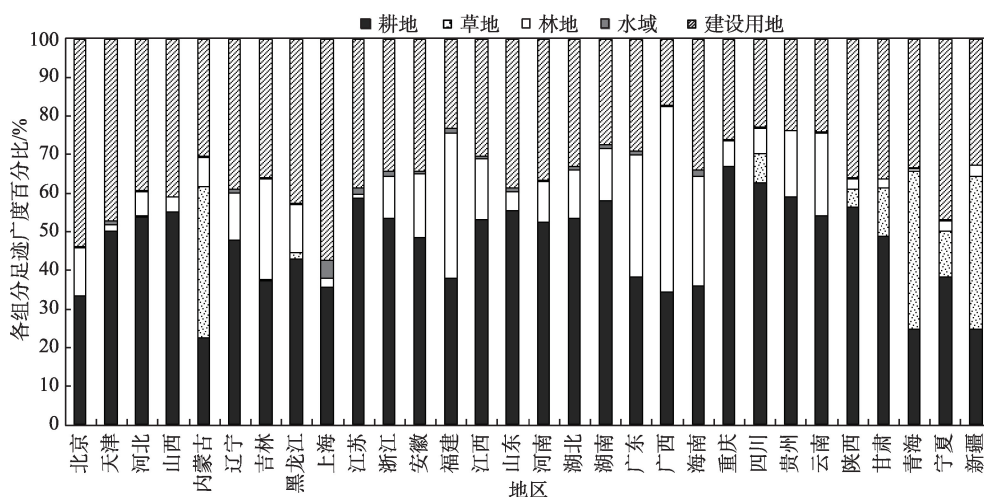


图6 2015年中国省际不同地类的足迹广度与组分占比

Fig.6 Percentage of ecological footprint size of different lands in 30 provinces (municipalities, autonomous regions) of China, 2015

要集中在水产品偏好明显的东部沿海省区,其余区域水域流量资本即可满足居民消费需求。林地在多数省区均保持自然原长1,仅上海、天津等森林覆盖率低和广西等林产品需求大的6个省区动用了存量资本。若某一地类出现生态赤字,则需消耗存量资本或从其他区域进口短缺资源以满足区域人口消费需求,这样会使本区域环境压力加剧或将本区域的环境压力转嫁到其他区域的生态生产性土地。

在足迹广度的组分构成方面,2015年耕地对中国足迹广度的贡献最大,占比达47%;其次为建设用地,占比29%;林地占比15%,草地和水域占比较小。由图5-6可知,各省区自然资本流量利用方式不尽相同,大多省区主要自然资本流量利用方式为耕地和建设用地,在研究末期有2/3的区域耕地足迹广度占比减少,耕地资本流动性降低。城市化水平高或人口密度大的区域,建设用地占用面积大,且该类用地足迹广度占比不断增大。草地资源禀赋条件好的区域(内蒙古、青海、新疆等),草地足迹广度占比较大,其中内蒙古、青海草地资本流动性增大,草地足迹深度始终未超过自然原长1,其余省区草地足迹广度均有缩减趋势,草地足迹深度有扩大趋势。森林覆盖率高的地区(福建、广西等),林地是其最主要的自然资本流量利用方式,研究末期,除广西、海南等林地足迹广度占比扩大,其余省区均缩减。水域面积广阔且水产品消费量大的沿海省区,水域足迹广度也较大,在研究末期多数省区的水域足迹广度有所扩大,说明城乡居民对水产品的需求增大、膳食结构有所优化。

4 中国自然资本利用可持续性与驱动因素分析

4.1 可持续性分析

利用式(5)-(6)测算了2006-2015年中国各省区平均资本流量占用率 OR_{flow} 和存量流量利用比 R_{flow}^{stock} (表2),以此衡量区域的生态压力及自然资本利用可持续性。

由表2可知,资本流量占用率高值区分布于上海、天津、广东、福建、北京、浙江、江苏7个东部沿海省区,占用率均达80%以上,其中最高为上海达100%,生态支撑系统承受巨大压力;资本流量占用率低值区分布在西部及少数中部省区,如青海、内蒙古、黑龙江等,占用率均不足50%,黑龙江最低仅为18.6%,该类区域足迹广度大,但资源禀赋条件好且人口消费需求低,环境压力较弱。资本流量占用率100%表明6类生态生产性土地均出现生态赤字,若低于100%表明某类用地仍存在生态盈余。存量流量利用比高值区分布于上海、天津、北京、山西、江苏、山东、浙江、广东等,最高可达29.69,最低为5.20,这些区域过度消耗存量资本弥补流量资本的不足,自然资本利用的可持续性较弱;存量流量利用比低值区分布于甘肃、海南、吉林、黑龙江、广西、青海、内蒙古、新疆等,均低于全国平均水平2.69,这些区域存量资本消耗低,流量资本占用高,自然资本利用可持续性最强;其他省区如陕西、河南、重庆、贵州、湖北等存量流量利用比均低于5,在生态亏损的背景下,自然资本利用可持续性较强。综合

表2 2006-2015年中国省际平均资本流量占用率和存量流量利用比

Tab.2 Average appropriation rate of capital flows and use ratio of stocks to flows in 30 provinces (municipalities, autonomous regions) of China, 2006-2015

地区	$OR_{flow}/\%$	R_{flow}^{stock}	地区	$OR_{flow}/\%$	R_{flow}^{stock}	地区	$OR_{flow}/\%$	R_{flow}^{stock}
北京	84.7	10.59	浙江	80.9	6.11	海南	70.6	2.49
天津	98.2	12.79	安徽	62.1	2.62	重庆	55.5	2.54
河北	53.0	4.83	福建	88.9	3.47	四川	50.1	1.32
山西	37.6	8.01	江西	62.5	1.68	贵州	37.1	2.40
内蒙古	25.9	2.31	山东	65.6	6.70	云南	32.9	1.07
辽宁	50.1	5.11	河南	60.6	3.62	陕西	32.1	3.20
吉林	31.5	1.64	湖北	53.2	2.45	甘肃	31.6	1.46
黑龙江	18.6	1.04	湖南	73.3	2.25	青海	22.8	0.70
上海	100.0	29.69	广东	89.0	5.20	宁夏	33.7	5.84
江苏	80.7	6.75	广西	70.7	1.37	新疆	41.3	1.94

来看,中西部省区自然资本流量利用空间还较大,尽可能扩大流量资本占用,降低存量资本消耗,可提高自然资本利用的可持续性;而东部省区自然资本流量利用空间较小,扩大流量资本占用以促进可持续发展的成效不大。2006-2015年中国资本流量占用率从50.46%波动升至53.57%,存量流量利用比从2.04升至3.17又降至3.06,表明中国自然资本利用可持续性呈现变好的趋势。

4.2 可持续性驱动因素分析

4.2.1 传统回归模型结果分析

自然和人文因素对中国自然资本利用可持续性的全局影响,运用最小二乘法(OLS)进行估计。通过共线性诊断,去掉方差膨胀因子 VIF 最大的3个自变量(人口、人均GDP、农村居民人均消费支出),剩余 VIF 小于10,达到回归分析的要求(表3)。

对比分析表3的各项影响因素,发现生态足迹

强度、城市化率的回归系数与存量流量利用比线性关系显著性高($p<0.05$),生态承载力的回归系数与因变量的显著性也较高($p<0.10$),其余自变量未通过10%的检验,显著性较低。

(1) 生态足迹强度和城市化率对中国自然资本利用可持续性影响显著。生态足迹强度每提高1%,引起存量流量利用比增加10.679%;城市化率每提高1%,引起存量流量利用比增加0.255%。生态足迹强度反映经济增长、技术进步对资源利用率的影响,其值越小,资源利用率越高,提高资源利用率可有效减弱生态压力,表明技术改进对促进自然资本利用可持续性有显著的正向带动效应。城市化水平提高,城市人口膨胀,居民消费结构升级,导致对生物资源的需求扩大,另外城市建设用地扩张,占用耕地、草地等生物资源,导致生物资源收缩,客观上引起生态压力加剧,自然资本利用的可持续程度减弱,表明经济社会和生态环境还未实现共耦协调发展。

(2) 生态承载力对自然资本利用可持续性影响较显著。生态承载力每提高1%,引起存量流量利用比降低1.722%。生态承载力反映区域自然资源禀赋条件,合理规划土地,明确限制开发区和生态保护区的范围,保护土地资源,尤其要加强耕地、草地、水域和林地等生物质资源的保护,可减少自然资本存量的消耗。

(3) 第二产业比重、城镇居民人均消费支出和资本存量对自然资本利用可持续性影响显著性低。第二产业比重的估计系数为正,产业结构是自然资本利用的“转换器”(马明德等, 2014),调整产业

表3 最小二乘法估计结果

Tab.3 Estimated results of the ordinary least squares (OLS) analysis

自变量	系数估计	标准差	t 统计量	显著性 p
常数项	-72.994	58.027	-1.26	0.221
第二产业比重	0.011	0.095	0.11	0.910
城市化率	0.255	0.113	2.26	0.034
城镇居民人均消费支出	6.565	6.281	1.05	0.307
生态承载力	-1.722	0.970	-1.77	0.089
资本存量	-0.412	1.098	-0.38	0.711
生态足迹强度	10.679	4.099	2.61	0.016

注:残差的Moran's I 指数为-0.087,显著性 p 值为0.610,残差项呈空间随机分布。

结构,降低第二产业比重,可减轻自然资本消耗。城镇居民人均消费支出的估计系数为正,中国城镇居民人均消费支出年均增长率在11%左右,消费需求持续增长,自然资本利用程度加重。资本存量作为物质资本投入,反映了政策倾斜力度,对自然资本利用可持续性的全局影响并不明显。

4.2.2 地理加权回归结果分析

采用GWR模型对生态足迹强度、城市化率和生态承载力3项显著性因子进行分析,从调整的 R^2 值看,GWR模型为0.737,高于OLS模型的拟合优度(0.625),表明GWR模型的拟合结果优于OLS模型。基于GWR模型3个自变量回归系数的空间分布情况(图7)可定量刻画自变量对因变量影响程度的空间差异。

生态足迹强度对存量流量利用比影响的空间差异特征如图7a所示。生态足迹强度对中国自然资本利用可持续性的影响程度由东向西减少,对浙江的影响最大(回归系数17.88),对新疆的影响最小(回归系数7.00)。东部远比西部地区经济实力雄厚、技术水平高,提高相同的资源利用率,东部会比西部获得更大的资源环境效益。在资源流动性难以扩大的前提下,通过技术进步提高自然资本利用效率,是促进可持续发展行之有效的途径。

城市化率对存量流量利用比影响的空间差异特征如图7b所示。城市化对中国自然资本利用可持续性的影响程度由东向西减少,其中上海的自然资本利用可持续性受城市化的影响最大(回归系数0.47),四川最小(回归系数0.21)。城市化水平东部高于西部,资源禀赋条件西部强于东部,导致东部

比西部承受更大的生态压力。若只追求经济社会发展,不兼顾区域实际的自然条件和环境影响,那么城市化的推进会对生态造成持续的负向效应。因此加强绿色生产和消费,并结合区域实际情况因地制宜地利用与管理自然资本极为重要。

生态承载力对存量流量利用比影响的空间差异特征如图7c所示。生态承载力对中国自然资本利用可持续性的影响程度大体呈现由东北向西南减少的空间格局,其中对浙江的影响最大(回归系数-4.07),对广西的影响最小(回归系数0.04)。对于人口、经济密集的区域,生态承载力低又过度消耗自然资本存量,造成资源禀赋条件很难改善且改善程度有限,若在该类区域注重土地资源的保护,对其自然资本利用可持续性的提升潜力要远大于资源禀赋条件好的区域。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 中国足迹深度与生态足迹、生态赤字的变化趋势高度一致,2006-2015年先增长后下降,从3.04增至4.17又变动到4.06,一年的资源消耗量需3~4年才可再生。足迹深度大致呈现由东向西减少的空间格局,最大、最小值分别是上海(30.69)、青海(1.70)。

(2) 中国足迹广度研究期内波动幅度较小,为0.363~0.393 $\text{ghm}^2/\text{人}$ 。足迹广度的最大、最小值分别是新疆(0.81 $\text{ghm}^2/\text{人}$)、上海(0.09 $\text{ghm}^2/\text{人}$),空间分布大致呈西部>中部>东部格局,但资本流量占用

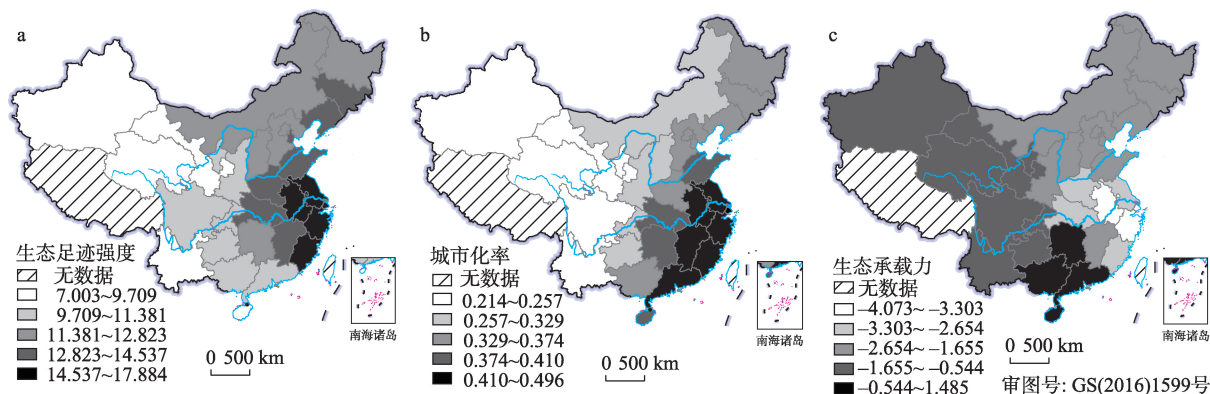


图7 GWR模型生态足迹强度、城市化率和生态承载力回归系数的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of regression coefficients of three independent variables including the intensity of ecological footprint, urbanization rate, and ecological carrying capacity of the geographically weighted regression (GWR) model

率却呈现与此相反的空间格局,因此中、西部自然资本流量流动性的提升空间大于东部。

(3) 中国各省区足迹深度的主要组分是化石能源用地,其次为草地,其他用地分项在各省区表现不尽相同。多数省区足迹广度的主要组分是耕地和建设用地,其次为林地,草地和水域占比小;在草地或林地资源丰富的省区,此分项的足迹广度也大,在水产品偏好的东部沿海地区,水域足迹广度占一定比重。

(4) 东部沿海省区存量资本消耗严重超前于流量资本占用,自然资本利用可持续性弱;中部和西部一些省区存量流量利用比低于全国平均水平2.69,自然资本利用可持续性较强。生态足迹强度、城市化率和生态承载力对自然资本利用可持续性有显著影响,且这些因素的影响程度呈现出空间差异性。其中,生态足迹强度每提高1%,引起存量流量利用比增加10.679%;城市化率每提高1%,引起存量流量利用比增加0.255%;生态承载力增加1%,存量流量利用比降低1.722%。

5.2 讨论

从消费视角核算的2008年中国自然资本利用情况与生产视角(方恺,李焕承,2012)核算的结果存在差异。在经济社会发展水平高的东部省区,消费性足迹深度明显比生产性的高,如上海、北京、天津消费性足迹深度分别为30.43、12.11、11.08,生产性足迹深度分别为5.00、4.50、9.48,说明区域消费需求比生产造成了更大的生态压力。消费性足迹广度比生产性足迹广度偏小,尤其在资源禀赋较好的中、西部地区表现明显,如内蒙古、新疆、青海消费性足迹广度分别为0.81 ghm²/人、0.78 ghm²/人、0.62 ghm²/人,生产性足迹广度分别为3.05 ghm²/人、1.61 ghm²/人、1.83 ghm²/人,反映出中西部省区生产性生态占用显著高于消费性生态占用。从生产和消费视角得出的研究结果也从侧面反映了中国需要建立多元化的跨区域横向生态补偿机制,生产足迹超前于消费足迹的省区,为生态供给区,应该获得补偿;消费足迹超前于生产足迹的省区,为生态受益区,应拿出一部分经济社会成果转移支付给生态供给区。

需要说明的是:本文生物资源账户和化石能源账户所涉及的产品项目远不及实际消费,未来有必要拓宽参与核算的产品项目,提高三维生态足迹精确性以满足实际应用的需求。另外,本文仅对中国

省际足迹深度和足迹广度的空间差异性作了详细研究,从中国省际自然资本利用空间格局得知,自然资本利用情况存在地域集聚性,因此对于自然资本利用空间关联性还有待进一步研究,以便明晰区域间相互作用机制,为自然资本在宏观尺度上合理有效利用提供决策参考。

参考文献(References)

- 杜悦悦, 彭建, 高阳, 等. 2016. 基于三维生态足迹的京津冀城市群自然资本可持续利用分析[J]. 地理科学进展, 35(10): 1186-1196. [Du Y Y, Peng J, Gao Y, et al. 2016. Sustainability evaluation of natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. Progress in Geography, 35(10): 1186-1196.]
- 方恺. 2013. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 33(1): 267-274. [Fang K. 2013. Ecological footprint depth and size: New indicators for a 3D model[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(1): 267-274.]
- 方恺. 2014. 1999-2008年G20国家自然资本利用的空间格局变化[J]. 资源科学, 36(4): 793-800. [Fang K. 2014. Changes in the spatial distribution of natural capital use among G20 countries from 1999 to 2008[J]. Resources Science, 36(4): 793-800.]
- 方恺. 2015. 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[J]. 生态学报, 35(11): 3766-3777. [Fang K. 2015. Assessing the natural capital use of eleven nations: An application of a revised three-dimensional model of ecological footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(11): 3766-3777.]
- 方恺, Heijungs Reinout. 2012. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J]. 地理科学进展, 31(12): 1700-1707. [Fang K, Reinout H. 2012. A review on three-dimensional ecological footprint model for natural capital accounting[J]. Progress in Geography, 31(12): 1700-1707.]
- 方恺, 高凯, 李焕承. 2013. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J]. 地理研究, 32(9): 1657-1667. [Fang K, Gao K, Li H C. 2013. International comparison of natural capital use: A three-dimensional model optimization of ecological footprint[J]. Geographical Research, 32(9): 1657-1667.]
- 方恺, 李焕承. 2012. 基于生态足迹深度和广度的中国自然资本利用省际格局[J]. 自然资源学报, 27(12): 1995-2005. [Fang K, Li H C. 2012. Provincial pattern of China's natural capital use: A modification and application of eco-

- logical footprint depth and size[J]. *Journal of Natural Resources*, 27(12): 1995-2005.]
- 靳相木, 柳乾坤. 2017. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究: 以温州市为例[J]. *生态学报*, 37(9): 2982-2993. [Jin X M, Liu Q K. 2017. Analysis of a land carrying capacity index based on an expanded three-dimensional ecological footprint model: A case study of Wenzhou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(9): 2982-2993.]
- 刘某承, 李文华, 谢高地. 2010. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. *生态学报*, 29(3): 592-597. [Liu M C, Li W H, Xie G D. 2010. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 29(3): 592-597.]
- 马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 2014. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. *生态学报*, 34(3): 682-689. [Ma M D, Ma X J, Xie Y Z, et al. 2014. Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of Ningxia and influencing factors: Partial least-squares regression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(3): 682-689.]
- 马维兢, 刘斌, 杨德伟, 等. 2017. 基于三维生态足迹模型的流域自然资本动态评估: 以福建省九龙江流域为例[J]. *资源科学*, 39(5): 871-880. [Ma W J, Liu B, Yang D W, et al. 2017. Dynamic evaluation of natural capital using the three-dimension ecological footprint model: The Jiulong River Basin in Southeast China[J]. *Resources Science*, 39(5): 871-880.]
- 孙才志, 张智雄. 2017 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. *生态学报*, 37(21): 7048-7060. [Sun C Z, Zhang Z X. 2017. Assessment of water ecological footprint size, depth, and spatial pattern in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(21): 7048-7060.]
- 孙克, 徐中民. 2016. 基于地理加权回归的中国灰水足迹人文驱动因素分析[J]. *地理研究*, 35(1): 37-48. [Sun K, Xu Z M. 2016. The impacts of human driving factors on grey water footprint in China using a GWR model[J]. *Geographical Research*, 35(1): 37-48.]
- 谢鸿宇. 2008. 生态足迹评价模型的改进和应用[M]. 北京: 化学工业出版社. [Xie H Y. 2008. Improvement and application of ecological footprint evaluation model[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press.]
- 徐中民, 程国栋, 张志强. 2006. 生态足迹方法的理论解析[J]. *中国人口·资源与环境*, 16(6): 69-78. [Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. 2006. A resolution to the conception of ecological footprint[J]. *China Population, Resources and Environment*, 16(6): 69-78.]
- 张星星, 曾辉. 2017. 珠江三角洲城市群三维生态足迹动态变化及驱动力分析[J]. *环境科学学报*, 37(2): 771-778. [Zhang X X, Zeng H. 2017. Dynamic of three dimensional ecological footprint in the Pearl River Delta and its driving factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(2): 771-778.]
- Daly H E, Farley J. 2004. *Ecological economics: Principles and applications*[M]. Washington, DC: Island Press.
- Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. 2002. *Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships*[M]. New York: John Wiley.
- Lin, D. Hanscom, L. Martindill, J. et al. 2018. *Working guidebook to the national footprint accounts. 2018 edition*[M]. Oakland, CA: Global Footprint Network.
- Mancini M S, Galli A, Niccolucci V, et al. 2017. Stocks and flows of natural capital: Implications for ecological footprint[J]. *Ecological Indicators*, 77: 123-128.
- Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. 2009. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. *Ecological Modelling*, 220(20): 2819-2823.
- Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. 2011. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. *Ecological Modelling*, 222(16): 2939-2944.
- Rees W E. 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 4(2): 121-130.
- Wackernagel M, Rees W E. 1996. *Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth*[M]. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers.

Spatiotemporal evolution and driving forces of natural capital utilization in China based on three-dimensional ecological footprint

ZHENG Defeng, LIU Xiaoxing, WANG Yanyan, LV Leting

(School of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Dynamic assessment of natural capital utilization can help to track consumption demand of residents and ecological sustainability of regions. To date, studies on natural capital utilization in China's provinces based on the three-dimensional ecological footprint has only measured and evaluated the spatial patterns of regional natural capital stock and flow from the perspective of production. In this study, the footprint depth and size of regions and different land use types in 30 provinces (municipalities, autonomous regions) of China from 2006 to 2015 were first calculated from the consumption perspective. Then the regional sustainability of natural capital utilization was characterized by utilization ratio of stock to flow and occupancy rate of capital flows. Lastly, the driving factors and effects of natural capital utilization were quantified by the methods of ordinary least squares (OLS) and geographically weighted regression (GWR). The results are as follows: (1) China's footprint depth was highly consistent with the changing trend of ecological footprint and ecological deficit—it showed a trend of first growing and then decreasing during 2006 to 2015, and the value changed from 3.04 to 4.06. The main reason is that the continuous rising trend of ecological pressure was reversed due to the reduced contribution of fossil energy land. Ecological footprint depth presented significant differences from east to west—in Shanghai it is up to 30.69 and in Qinghai it is a minimum of 1.70. (2) Ecological footprint size in China was influenced by resource endowments and showed a small fluctuation through time, with an overall pattern of western region > central region > eastern region in space, and the maximum and minimum footprint sizes were respectively 0.81 ghm² in Xinjiang and 0.09 ghm² in Shanghai. Natural capital flow can be improved greatly in the central and western regions. (3) The main components of footprint depth in Chinese provinces were fossil energy land and grassland, and the utilization degrees of other lands varied in different regions. The main components of footprint size in Chinese provinces were cultivated land and construction land, followed by woodland, grassland and water area accounting for a small proportion. (4) The sustainability of natural capital utilization has become better in China, and it showed the spatial pattern of "weak east and strong west". By using OLS regression and GWR, we found that the significant factors that affected the sustainability of natural capital utilization were the intensity of ecological footprint, urbanization rate, and ecological carrying capacity. The influence degree of these factors in different geographical locations showed spatial differences.

Key words: three-dimensional ecological footprint; natural capital; sustainability; ordinary least squares analysis; geographical weighted regression; spatiotemporal evolution; China