#### DOI: 10.5846/stxb201901010003

郑德凤,刘晓星,王燕燕,吕乐婷.中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局.生态学报,2020,40(2):447-458. Zheng D F, Liu X X, Wang Y Y, Lü L T.Assessment of carbon footprint size, depth and its spatial-temporal pattern at the provincial level in China.Acta Ecologica Sinica,2020,40(2):447-458.

## 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局

### 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,大连 116029

摘要:借鉴三维生态足迹方法构建了碳足迹广度、深度测算模型,对吸纳碳排放所占用的自然资本流量、存量进行区分,核算了2000—2016年中国 30 个省(市、自治区)碳足迹广度和碳足迹深度,并对其进行空间关联性分析。结果显示:①中国碳足迹广度受碳足迹和碳生态承载力的综合影响,由 0.173 hm²/人升至 0.329 hm²/人又降至 0.301 hm²/人;碳足迹广度高值区集中于东北、西北和西南地区,其自然资本流量尚未完全占用,低值区集中于东部沿海和中部,其自然资本流量已不足以补偿碳排放。②2008年起中国碳足迹深度突破自然原长 1,数值由 1.04 升至 1.42 又降至 1.31;研究期内碳足迹深度始终处于自然原长 1 的有 10 个地区,高值区集中于东部沿海和中部,尤其是上海可达 298.83,以存量资本耗竭为主且生态持续性弱。吸纳碳排放所占用 的流量资本和存量资本存在地域互补性。③中国碳足迹广度、深度呈显著的空间正相关。碳足迹广度 H-H 集聚区分布于东北和西北,该类集聚有减弱趋势;碳足迹深度 H-H 集聚区主要分布于东部沿海且向中部扩散,该类集聚有增强趋势。通过引入碳 足迹广度、深度两项指标对碳足迹的研究方法进行了深化和完善,在碳排放对生态环境影响规模的刻画和表达上取得了较优于 传统碳足迹的评价结果。

关键词:碳足迹广度;碳足迹深度;碳足迹;自然资本;空间自相关;时空格局

# Assessment of carbon footprint size, depth and its spatial-temporal pattern at the provincial level in China

ZHENG Defeng, LIU Xiaoxing<sup>\*</sup>, WANG Yanyan, LÜ Leting School of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

**Abstract**: The relationship between carbon emissions and carbon absorption is unbalanced, and the carbon cycle system is facing tremendous ecological pressure at present in China. In this paper, a carbon footprint size and depth measurement model was firstly established based on the three-dimensional ecological footprint method. Then we used this model to distinguish the natural capital flow and stock occupied by absorbing carbon emissions. Furthermore, the carbon footprint size and depth of 30 provinces were calculated on the basis of energy consumption from 2000 to 2016. The spatial correlation of carbon footprint size (depth) was analyzed by spatial autocorrelation method. The results showed as follows: (1) The carbon footprint size in China was affected by carbon footprint and carbon ecological carrying capacity. It showed an increase from 0.173 hm<sup>2</sup>/person to 0.329 hm<sup>2</sup>/person and then decrease to 0.301 hm<sup>2</sup>/person. The high-value areas of carbon footprint size were the northeast, northwest and southwest regions where the natural capital flow was not yet fully occupied. The low-value areas were mainly distributed in the eastern coast and the central regions where the natural capital flow was insufficient to compensate for carbon emissions. (2) The provincial carbon footprint depth has exceeded the natural length of 1, and the depth increased from 1.04 to 1.42 and then decreased to 1.31 since 2008. The carbon footprint depth in

基金项目:国家社会科学基金项目(17BJL105)

收稿日期:2019-01-01; 网络出版日期:2019-11-04

#限于数据可获取性,本研究尚缺中国西藏、中国港澳台的统计数据。

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liuxiaoxing93@163.com

10 provinces was always at the natural length of 1 from 2000 to 2016. The high-value areas of carbon footprint depth were the eastern coast and the central regions where the natural capital stock was consumed by carbon emissions and the ecological sustainability was weak, while the highest depth occurred in Shanghai with 298.83. There existed the regional complementarity between natural capital flow and natural capital stock for absorbing carbon emissions. (3) Using the global spatial autocorrelation analysis, we found that carbon footprint size and depth showed the positive correlation and significant spatial agglomeration in all provinces of China. Through the local spatial autocorrelation analysis, the High-High agglomeration areas of carbon footprint size were mainly distributed in the northeast and northwest regions, and there was a tendency of number decrease of High-High agglomeration areas. Moreover, the High-High agglomeration areas of carbon footprint depth were mainly distributed in the eastern coastal areas and there was an obvious spread trend toward the adjacent regions. By introducing the two indexes of carbon footprint size and carbon footprint depth, the research methods of carbon footprint are further improved, and the evaluation results are more accurate and reasonable than the results by the traditional carbon footprint theory.

Key Words: carbon footprint size; carbon footprint depth; carbon footprint; natural capital; spatial autocorrelation; spatial-temporal pattern

以全球变暖为主要特征的气候变化已成为人类社会面临的严峻挑战,减少温室气体排放和践行低碳发展已成为世界各国共识<sup>[1]</sup>。中国正经历着快速城市化和工业化,能源消费引起的碳排放一直处于高位状态,另外森林、草地等陆地生态系统面积缩减引起碳吸收能力降低,导致碳排放与碳吸收之间的关系失衡,碳循环系统承受着巨大的生态压力。中国高碳排放居于全球首位,这无疑给中国的减排责任分摊带来了巨大的国际压力,中国承诺到2020年将单位国内生产总值的碳排放较2005年削减40%—45%。在此背景下,明确各区域碳排放对生态环境的影响规模和需求对于实施差别化减排、增强生态系统固碳能力有重要的理论意义和实践意义。

碳足迹是国内外普遍认可的评估碳排放强度和气候变化的研究方法[2]。碳足迹是在生态足迹的基础上 提出的,表征人类活动碳排放对自然系统的压力程度[3]。国际上对碳足迹主要有两种理解:一种是将碳足迹 视为人类活动过程中排放的温室气体总量[4],即碳排放量;另一种是将碳足迹视为吸纳人类活动过程中排放 的温室气体所占用的生态生产性土地面积[5-6]。迄今为止,国内外学者针对碳排放和碳足迹相关问题进行了 大量研究,研究角度、研究对象、研究尺度和研究方法多种多样。有从产品<sup>[7-8]</sup>、家庭<sup>[9-10]</sup>、行业<sup>[11-13]</sup>、土地利 用<sup>[14]</sup>、区域<sup>[15]</sup>、国家<sup>[16]</sup>等不同尺度的研究,有从消费视角和生产视角的研究<sup>[17-18]</sup>,也有对直接碳排放和间接 碳排放的研究<sup>[19]</sup>。碳足迹的研究方法常见的有投入产出法<sup>[20]</sup>、生命周期法<sup>[21]</sup>和 IPCC 计算方法<sup>[22]</sup>。Zhang 等<sup>[23]</sup>基于生命周期分析法(LCA)对中国不同区域粮食生产的碳足迹进行估算,并分析了碳汇和控制碳排放 的重要因素:Sommer 等<sup>[24]</sup>采用成熟的宏观经济投入产出模型以5组家庭收入核算了欧盟27国的私人消费 碳足迹,结果显示出一种相对的脱钩效应,收入最高群体在收入上的份额远远大于其在碳足迹的份额,反之亦 然; Man 等<sup>[25]</sup>基于投入产出分析揭示了澳大利亚建筑业的总碳足迹并确定主要贡献的供应链、行业和产品; Chen 等<sup>[26]</sup>构建了多尺度的全球多区域投入产出模型(MRIO)来描述中国五大城市和澳大利亚五大城市之间 的跨国城市碳足迹网络;王钰乔等[27]采用生命周期法核算了中国小麦和玉米生产碳足迹,并基于不同的种植 面积和化肥农药施用量设置4种情景模拟分析了小麦和玉米的碳足迹;姚亮等<sup>[28]</sup>借助 EORA 数据库,基于投 人产出的生命周期评价法并结合结构分解、截面分析等方法系统深入研究中国居民家庭消费碳足迹的总量、 组成、贡献因素及未来变化趋势;石敏俊等<sup>[20]</sup>、庞军等<sup>[29]</sup>基于 MRIO 模型,结合生命周期法测算了中国各省 区碳足迹及省际间碳转移情况:李伯华等<sup>[30]</sup>以南岳衡山为例,运用生命周期理论构建景区旅游交通碳足迹计 算模型,对不同交通方式的碳足迹及其影响因素进行了分析;赵荣钦等[31]基于 IPCC 给定的能源净发热值和 碳排放系数等,构建了能源消费碳排放模型,并对中国不同产业空间的碳排放强度和碳足迹进行了研究。

纵观现有的研究成果,碳足迹领域已经取得了一定进展,但尚存在一些不足,关于区域碳足迹的研究大多 学者主要聚焦于人类活动产生的碳排放,其无法刻画碳排放与碳汇之间的平衡关系,若将碳足迹和碳生态承 载力相结合研究可较好地解决这一问题;另外,传统的碳足迹模型尽管能够体现区域碳赤字或碳盈余情况,一 定程度上反映了碳排放对生态系统所造成的压力,但却无法评估碳赤字在区域本底生态系统的空间累积效 应,而在生态足迹研究领域为解决生态赤字的累积效应,Niccolucci等<sup>[32]</sup>提出三维生态足迹概念,通过足迹广 度和足迹深度这两个指标区分了自然资本流量和存量,基于此,本文借鉴生态足迹三维模型试图将碳足迹的 研究向纵深扩展。本文以 2000—2016年中国 30 个省区的终端能源消费数据和土地利用数据为数据源,核算 碳排放和碳汇情况,在此基础上进一步将碳足迹、碳生态承载力和碳生态赤字相结合,引入碳足迹广度、碳足 迹深度两项指标并对其内涵进行了界定,旨在区分吸纳碳排放所占用的自然资本流量、存量,可为碳足迹相关 领域的研究提供新方法,以中国各省市为例的实证分析结果亦可为制定碳减排和生态可持续发展相关政策提 供参考和借鉴。

#### 1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

#### 1.1.1 碳排放计算模型

由于化石能源消耗是造成碳排放的主要原因,因此本文仅采用各省能源平衡表中的终端能源消费量核算 区域碳排放,所包含的能源消费账户有原煤、洗精煤、焦炭、焦炉煤气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石 油气、炼厂干气、天然气等 12 项。参照国际通用及公认的 IPCC 方法<sup>[33]</sup>核算碳排放,其计算公式为:

$$CE = \sum_{i=1}^{12} Qe_i \times Se_i \times De_i$$
<sup>(1)</sup>

式中, *CE*为能源消费的碳排放总量(t);  $Qe_i$ 为第*i*种能源的终端消费量(t或m<sup>3</sup>);  $Se_i$ 为第*i*种能源的标准煤折 算系数(kg/kg),来自中国能源统计年鉴;  $De_i$ 为碳排放系数,采用 IPCC 碳排放计算指南的给定值<sup>[33]</sup>: 原煤、洗 精煤(0.7559), 焦炭(0.8550), 焦炉煤气(0.3548), 原油(0.5857), 汽油(0.5538), 煤油(0.5714), 柴油 (0.5921),燃料油(0.6185),液化石油气(0.5042), 炼厂干气(0.4602), 天然气(0.4483)。

1.1.2 碳汇计算模型

在不同的土地类型中,农田生态系统吸收的碳在收割季会被分解到大气中,其是否有净吸收量和吸收量 大小存在一定争议,故本文仅考虑森林和草地的碳汇功能,两者碳吸收能力合计为93%<sup>[34]</sup>。区域碳汇计算公 式<sup>[17]</sup>如下:

$$CS = A_f \times \text{NEP}_f + A_g \times \text{NEP}_g \tag{2}$$

式中,*CS*为森林和草地的碳吸收总量(t); $A_f$ 为区域森林面积(hm<sup>2</sup>), $A_g$ 为区域草地面积(hm<sup>2</sup>);NEP<sub>f</sub>和 NEP<sub>g</sub>为全球森林和草地的固碳能力,采用谢鸿宇的研究成果分别为 3.8096 t/hm<sup>2</sup>、0.9482 t/hm<sup>2[34]</sup>。

1.1.3 碳足迹、碳生态承载力、碳生态赤字计算模型

本文将碳足迹视为碳排放的生态足迹,即吸纳碳排放量所需占用的生态生产性土地面积。净生态系统生产量(net ecosystem production, NEP)反映植被对碳的净吸收能力,代表 1 hm<sup>2</sup>植被一年的固碳量,利用 NEP 可实现能源消费的碳排放量与碳足迹之间的转化。碳足迹计算公式<sup>[17]</sup>:

$$CEF = CE \times \left(\frac{p_{\rm f}}{\rm NEP_{\rm f}} + \frac{p_{\rm g}}{\rm NEP_{\rm g}}\right)$$
(3)

$$CEC = CS \times \left(\frac{p_{\rm f}}{\rm NEP_{\rm f}} + \frac{P_{\rm g}}{\rm NEP_{\rm g}}\right)$$
(4)

$$CED = CEF - CEC \tag{5}$$

式中,CEF、CEC、CED分别为能源消费的碳足迹、碳生态承载力、碳生态赤字(hm<sup>2</sup>);P<sub>f</sub>和P<sub>g</sub>分别为全球森林

和草地的碳吸收比例,分别为 82.72%、17.28%<sup>[34]</sup>。从模型维度看,传统碳足迹属于二维模型,碳足迹可由碳 生态承载力和碳生态赤字相加得到。

#### 1.1.4 碳足迹广度、深度计算模型

森林和草地作为吸纳化石能源燃烧排放的二氧化碳关键的自然资本,按其属性可区分为森林、草地自然 资本存量和流量。本文借鉴三维生态足迹模型<sup>[35]</sup>,通过引入碳足迹广度和碳足迹深度这两项指标分别刻画 吸纳碳排放所占用的流量资本和存量资本。碳足迹广度定义为在碳生态承载力范围内实际占用的生态生产 性土地面积,表征吸纳碳排放所占用的自然资本流量,强调碳汇土地资源的有限性;碳足迹深度定义为碳生态 赤字背景下吸纳1年的碳排放量理论上所需占用的土地面积倍数,表征吸纳碳排放所消耗的自然资本存量, 强调碳排放与碳汇之间的不同步性。当流量资本不足以消纳年际碳排放量,存量资本将被作为补存而消耗。 在碳生态赤字情况下,尽量扩大流量资本占用,减少存量资本消耗,是缓解碳循环系统生态压力和增强生态持 续性的有效途径。参照三维生态足迹的相关研究<sup>[36]</sup>,推导出区域碳足迹广度、深度(三维指标)的计算公式:

$$CEF_{size} = min(CEF, CEC)$$
 (6)

$$CEF_{depth} = 1 + \frac{max(CEF - CEC, 0)}{CEC}$$
(7)

式中,CEF<sub>size</sub>为区域碳足迹广度(hm<sup>2</sup>),0<CEF<sub>size</sub> ≤ CEC,碳生态承载力是区域生态生产性土地可提供的流量 资本上限;CEF<sub>depth</sub>为区域碳足迹深度(无量纲),CEF<sub>depth</sub>≥1,1为碳足迹深度的自然原长,其中,当CEF ≤ CEC,CEF<sub>depth</sub>=1,表征区域流量资本可完全消纳年际碳排放;当CEF>CEC,CEF<sub>depth</sub>>1,表征区域流量资本已无 法满足碳汇需求,需动用存量资本。由方恺等<sup>[36]</sup>的研究可知,碳足迹广度、深度可分别视为圆柱体的底面和 柱高,碳足迹可由这两个指标相乘得到,属于三维模型。

碳足迹广度和深度与传统的碳足迹相比:通过模型增维,将碳排放所占用的流量资本和存量资本进行区分,刻画了碳赤字在区域本底生态系统的累积效应;克服了以往单纯凭借碳赤字或碳足迹评价区域生态持续性的局限,且强调了吸纳碳排放所消耗的存量资本对生态持续性的影响;不仅关注碳汇土地的有限性,还关注碳排放和碳汇之间的不同步性,赋予了其更丰富的生态学内涵。

#### 1.2 数据来源

本文选取的终端能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴》(2000—2017年),土地利用数据来源于自然 资源部的土地调查成果共享应用服务平台(2009—2016年)、全国土地利用变更调查报告(2000—2003年)和 《中国统计年鉴》(2001—2017年)。

#### 2 结果与分析

2.1 碳足迹和碳生态承载力

通过公式(1)—(4)计算出 2000—2016 年中国及各地区的碳足迹和碳生态承载力(图 1—2),为体现公 平性,本文采用"人均碳足迹和人均碳生态承载力"进行分析。

由图 1 可知,研究期内中国碳足迹总体呈波动上升趋势。其中 2000—2013 年中国碳足迹经历了一个明显上升的过程,由 0.173 hm<sup>2</sup>/人升至 0.434 hm<sup>2</sup>/人,表明能源消费产生的碳排放对生态环境施加的压力持续增加;2013—2016 年中国碳足迹呈小幅下降趋势,到 2016 年降至 0.396 hm<sup>2</sup>/人,表明碳排放造成的生态压力有所缓和,这可能是得益于产业结构优化升级、低碳能源用量增加、能源利用效率提高和节能减排政策的实施。研究期内中国碳生态承载力呈波动下降态势,由 0.321 hm<sup>2</sup>/人变动至 0.337 hm<sup>2</sup>/人又下降至 0.301 hm<sup>2</sup>/人。自 2008 年起,中国碳足迹超过碳生态承载力,出现碳生态赤字,生态生产性土地面积已无法完全补偿能源消费产生的碳排放,2008 年补偿率为 95%,到 2016 年补偿率仅为 76%。

从 2000—2016 年各地区的平均碳足迹、平均碳生态承载力来看(图 2),碳足迹排名前五的是宁夏、内蒙



图 1 2000-2016 年中国碳足迹和碳生态承载力时间变化趋势

Fig.1 The changing trend of carbon footprint and carbon ecological capacity in China from 2000 to 2016





古、山西、上海和天津,高碳足迹主要集中于煤炭资源丰富及人口、经济密集地区;碳足迹排名后五的是江西、 广西、海南、安徽和四川,这些区域由碳排放造成的生态压力相对较低。碳生态承载力较大的地区是青海、内 蒙古、新疆、黑龙江和云南,主要集中于森林、草地面积广阔地区;上海、江苏、天津、山东和河南等碳生态承载 力较小。由 2000—2016 年各地区的平均碳生态赤字还可得知,出现碳生态赤字的地区有 15 个,按降序排序 依次是上海、天津、宁夏、河北、山西等地区,上海碳生态赤字为全国之最,达 0.566 hm²/人;碳生态盈余的地区 有 15 个,青海最大(3.255 hm²/人),内蒙古(1.625 hm²/人)位居其次。

2.2 碳足迹广度和碳足迹深度

#### 2.2.1 碳足迹广度

结合碳足迹和碳生态承载力的计算结果,利用公式(6)测算出 2000—2016 年中国各地区的碳足迹广度, 采用自然断点法对碳足迹广度进行梯度划分并保证各时间断面划分阈值一致,选取 2000 年、2008 年、2016 年 和 17 年的平均值进行空间化制图,以便探讨碳足迹广度的空间分布格局(图 3)。

中国碳足迹广度计算结果显示,2000—2007年中国碳足迹广度与碳足迹关联,数值由 0.173 hm<sup>2</sup>/人升至 0.321 hm<sup>2</sup>/人;自 2008年出现碳生态赤字后,碳足迹广度与碳足迹脱钩并与碳生态承载力挂钩,数值由 0.329 hm<sup>2</sup>/人波动下降至 0.301 hm<sup>2</sup>/人,这一阶段吸纳碳排放所占用生态生产性土地面积已达自然资本流量的上限 且自然资本流动性不断降低。

2 期

40 卷





由图 3 可知,碳足迹广度受森林和草地资源空间分布的影响,高值区主要集中于西北、西南和东北地区, 按平均碳足迹广度排名依次为内蒙古、新疆、青海、吉林、贵州、陕西、黑龙江等,这 7 个地区碳足迹广度介于 0.288—0.702 hm<sup>2</sup>/人,合计占全国碳足迹广度的 45%;低值区主要集中于东部沿海,上海、江苏、天津、山东、河 南、北京、安徽、河北等碳足迹广度较小,这 8 个地区的碳足迹广度介于 0.003—0.103 hm<sup>2</sup>/人,合计仅占全国 碳足迹广度的 5%;其余地区碳足迹广度界定为中值区,数值介于 0.156—0.285 hm<sup>2</sup>/人。由图 3 还可得知,与 2008、2016 年相比,2000 年碳足迹广度整体上处于中等和低水平且无高值区,显示出在此期大多地区吸纳碳 排放所占用的自然资本流量较低;在不同时间断面,部分地区碳足迹广度的空间梯度类型变化较大,新疆、青 海、甘肃、内蒙古、陕西、云南、黑龙江等自然资本流量占用尚未达到上限的地区碳足迹广度增加程度明显,向 高值区变动;北京、河南、广东、浙江、宁夏等自然资本流量完全占用的地区碳足迹广度波动减少,向更低的梯 度变动。

#### 2.2.2 碳足迹深度

利用公式(7)测算出 2000—2016 年中国各地区的碳足迹深度,并选取 2000 年、2008 年、2016 年和 17 年 的平均值绘制碳足迹深度空间分布图,得到不同时间断面碳足迹深度的空间分布格局(图 4)。

中国碳足迹深度计算结果显示,2000—2007 年碳足迹深度一直处于自然原长 1,2008 年碳足迹深度 (1.04)突破 1,表明自 2008 年以来自然资本流量已不足以补偿日益增长的碳排放,需启用自然资本存量以满 足碳汇需求。2008—2016 年碳足迹深度呈先上升后下降趋势,到 2013 年碳足迹深度升至 1.42,到 2016 年碳 足迹深度降至 1.31,自然资本存量消耗持续上升的趋势得到遏制,此现象反映了碳排放量有所降低的实际情





况。研究末期中国需要 1.31 倍的碳汇土地面积才足以吸纳能源消费产生的碳排放,较 2008 年增长了 26%,可见总体上碳排放与碳汇之间的不同步性扩大。

图 4 显示,2000—2016 年碳足迹深度始终处于自然原长 1 的有内蒙古、黑龙江、江西、广西、四川等 10 个地区,其余地区森林和草地自然资本存量消耗不尽相同。高碳足迹深度区主要集中于东部和中部部分地区,特别是上海平均碳足迹深度高达 298.83,天津、江苏、山东位居其后,碳足迹深度平均值依次为 87.39、57.77、15.58,这些地区碳排放较强而碳汇能力较弱,碳循环系统承受着高度压力;北京、河北、河南、山西、宁夏碳足迹深度平均值依次为 6.30、5.31、4.38、2.90、2.76,吸纳碳排放所消耗的自然资本存量相对较高。其余 11 个地区的碳足迹深度平均值均低于 2.6,自然资本存量消耗相对较少,这些地区碳排放较弱而碳汇能力较强,碳生态压力相对较小。图 4 显示,碳足迹深度空间格局变动情况表现为:浙江、福建、广东、海南、湖南、贵州由自然原长状态转为动用存量资本状态;北京、河北、山西等 9 个地区碳足迹深度向更高的梯度变动。从碳足迹深度值的变化看,2016 年与 2000 年相比,江苏、河北和山东的增长率高达 150%以上,其中江苏碳足迹深度基数较大且变动幅度(279%)也较大,值由 22.27 变动至 84.43,河北的碳足迹深度由初期的第八位升至末期的第五位,值由 2.22 变动至 7.14;北京和福建增长率最小,低于 5%;上海和宁夏出现负增长,其中上海碳足迹深度基数大且下降幅度(77%)也较大,其值由 843.18 降至 195.45,由于上海森林和草地面积略微增加而带来的相对规模效应明显,使得碳足迹深度大幅回落。

2.3 碳足迹广度、深度空间自相关分析

#### 2.3.1 全局空间自相关分析

为探讨碳足迹广度、深度的空间关联性,运用 GeoDa 软件计算中国 30 个省市碳足迹广度、深度的全局自

相关 Moran's *I* 指数、*Z* 统计量和显著性水平 *P*,结果见表 1。需要说明的是,个别地区碳足迹深度很高,为使 计算数据更加均匀,此处将碳足迹深度取对数处理。

Table 1         The global spatial auto correlation index of carbon footprint size and depth in China							
年份 Year	Moran's I	Z(I)	Р	年份 Year	Moran's I	Z(I)	Р
2000	0.2009/0.3061	1.9567/3.4588	0.035/0.006	2009	0.2725/0.4849	2.7954/5.2319	0.006/0.001
2001	0.1750/0.3113	1.7636/3.5675	0.051/0.005	2010	0.3033/0.4905	3.0467/4.8408	0.004/0.001
2002	0.1814/0.3205	1.8475/3.6754	0.044/0.006	2011	0.2834/0.4898	2.9371/4.8569	0.005/0.001
2003	0.0747/0.3678	0.9029/3.7401	0.178/0.008	2012	0.3111/0.4892	3.1822/4.9203	0.003/0.001
2004	0.2644/0.4723	2.6069/4.5985	0.011/0.002	2013	0.3106/0.4973	3.1279/4.7493	0.004/0.001
2005	0.2846/0.4892	2.7986/4.9532	0.004/0.003	2014	0.3185/0.4920	3.1656/4.8233	0.004/0.001
2006	0.3054/0.4961	3.0189/4.8300	0.005/0.003	2015	0.2542/0.5005	2.9207/4.9065	0.007/0.001
2007	0.3259/0.4985	3.2212/5.0711	0.002/0.001	2016	0.2984/0.4866	3.0408/4.8817	0.006/0.002
2008	0.3014/0.4949	2.9248/4.6604	0.005/0.002				

表 1 中国碳足迹广度、深度全局 Moran's I 指数

注:表格中的第一列和第二列分别为碳足迹广度、碳足迹深度的 Moran's I,Z(I)和 P

从表1可以看出,除2001、2003年外,其余年份碳足迹广度全局 Moran's I 指数介于 0.1814—0.3259之间,通过了 5%的显著性水平检验,碳足迹广度表现为显著的空间正相关特征;全局 Moran's I 指数呈波动变化趋势,且在研究后期比研究前期大,表明中国碳足迹广度空间集聚效应有所增强。2000—2016年碳足迹深度 全局 Moran's I 指数介于 0.3061—0.5005之间,显著性水平为 1%,碳足迹深度表现为显著的空间正相关特征; 全局 Moran's I 指数整体波动上升,表明中国碳足迹深度空间集聚效应不断增强。

2.3.2 碳足迹广度局部空间自相关分析

为进一步探讨区域内的局部空间集聚特征,根据局部 Moran's I 指数和 Moran's I 散点图,得到 2000—2016 年各省区的空间集聚情况,并选取 2000 年、2016 年绘制碳足迹广度 LISA 集聚图(图 5)。



图 5 中国碳足迹广度 LISA 集聚分布图 Fig.5 LISA cluster map of carbon footprint size in China

由图 5 可知,碳足迹广度稳定存在 H-H 集聚的地区是黑龙江、吉林、内蒙古、甘肃、宁夏、青海和新疆,该 类集聚呈带状分布于东北和西北地区且向西南地区发展,这些地区森林和草地面积广阔,依靠自然资本流量 可满足碳汇需求(宁夏除外)。碳足迹广度稳定存在 L-L 集聚的地区是北京、天津、山东、江苏、安徽、上海,主 要集中于东部沿海地区且向中部扩散延伸,这些地区森林和草地覆盖率低,吸纳碳排放所占用自然资本流量 已达上限且区域可提供的流量资本有下降趋势。碳足迹广度 H-L 集聚和 L-H 集聚的变化范围无明显规律性。碳足迹广度稳定存在 H-L 集聚的地区仅贵州一省,贵州碳汇相对较强,后期阶段碳汇能力不足以消纳碳 排放,导致自然资本流量被完全占用,其处于碳足迹广度高值区。碳足迹广度稳定存在 L-H 集聚的地区是广西,研究期内,广西碳足迹广度始终与碳足迹挂钩,与周围地区相比,广西的产业结构层次偏低,能源资源型工 业产生的碳排放相对较少,导致自然资本流量占用也较少。2016 年与 2000 年相比,处于空间正相关(H-H 集聚和 L-L 集聚)的省区数量有所增加,中国碳足迹广度局部空间集聚现象存在增强趋势,具体地,H-H 集聚减弱,L-L 集聚增强。

2.3.3 碳足迹深度局部空间自相关分析

结合局部 Moran's I 指数和 Moran's I 散点图,得到不同时期中国碳足迹深度的局部空间集聚特征,选取 2000 年、2016 年绘制碳足迹深度的 LISA 集聚图(图 6)。



Fig.6 LISA cluster map of carbon footprint depth in China

由图 6 可知,碳足迹深度稳定存在 H-H 集聚的地区是北京、天津、河北、河南、山东、江苏、上海,主要集中 于部分东部沿海和中部地区,这些地区碳足迹高于碳生态承载力的倍数相对较大,吸纳碳排放所消耗的自然 资本存量相对较高。碳足迹深度稳定存在 L-L 集聚的空间范围较大,有黑龙江、吉林、内蒙古等 18 个省市,其 中吉林、重庆、贵州等 8 个省市碳足迹深度略大于 1,其余 10 个省市碳足迹深度处于自然原长 1,该类地区主 要依靠自然资本流量吸纳碳排放,而自然资本存量消耗程度低;值得注意的是,L-L 集聚邻接 H-H 集聚,若 L-L 集聚地区碳排放持续增加,之后落入 H-H 集聚区有很大的可能性。碳足迹深度稳定存在 H-L 集聚的仅宁 夏一个地区,宁夏能源资源丰富,在生产过程中能源投入力度大且能源利用处于低效率状态<sup>[37]</sup>,加之森林、草 地禀赋条件也不及周围地区,因此宁夏与相邻地区形成碳足迹深度 H-L 集聚。碳足迹深度稳定存在 L-H 集 聚的地区是浙江,浙江碳足迹深度在全国处于中等水平,由于浙江的工业以轻工业、加工制造业为主,能耗相 对少,自然资本存量利用程度相对于周围地区(如江苏、上海)较低。2016 年与 2000 年相比,处于空间正相关 (L-L 集聚和 H-H 集聚)的地区数量相同,具体地,H-H 集聚增强,L-L 集聚减弱。

#### 3 讨论

比较中国各地区碳足迹广度和碳足迹深度的空间分布情况,可以发现由碳足迹广度表征的流量资本占用 和碳足迹深度表征的存量资本消耗存在地域互补性,碳足迹广度低值区大致与碳足迹深度高值区相对应。中 国近三分之二的地区碳足迹深度超过自然原长1,导致其大幅消耗存量资本来弥补流量资本的不足。为探讨 碳足迹广度和深度在空间上的耦合特征,将各地区碳足迹广度、深度进行 Z-Score 标准化,并通过象限图进行 展示,基于图 7 标准化碳足迹广度、深度所在象限不同,本文将中国 30 个地区碳排放对自然资本的占用情况 划分为四种类型:





(1) 【类区域,该类型特点为碳足迹广度较大,碳足迹深度也较大,吸纳碳排放所占用的自然资本流量和存量均较高,碳循环系统压力较大,生态持续性较弱。属于该类型的仅宁夏一个省区,其碳生态承载力在全国处于中等水平,但由于其经济增长对能源资源依赖性大,使得碳排放较大程度上超出了区域碳汇能力,造成自然资本的双重利用。

(2) Ⅱ类区域,该类型特点为碳足迹广度小,但碳足迹深度大,吸纳碳排放所消耗的存量资本严重超前于流量资本,碳循环系统压力最大,生态持续性最弱。该类型包括上海、天津、江苏、山东、北京、河北、河南、山西,这8个地区平均碳足迹广度为0.058 hm²/人,平均碳足迹深度为59.80。

(3)Ⅲ类区域,该类型特点为碳足迹广度较小,碳足迹深度也较小,吸纳碳排放所消耗的存量资本和流量资本均较低,碳循环系统压力较小,生态持续性较强。该类型包括安徽、重庆、辽宁、浙江、广东、广西、海南、江西,这8个地区平均碳足迹广度为0.170 hm²/人,平均碳足迹深度为1.60。

(4) Ⅳ类区域,该类型特点为碳足迹广度大,但碳足迹深度小,吸纳碳排放所占用的流量资本超前于存量 资本,碳循环系统压力最小,生态持续性最强。该类型包括四川、湖南、湖北、云南、甘肃、福建、黑龙江、陕西、 贵州、吉林、青海、新疆、内蒙古,这13个地区平均碳足迹广度为0.330 hm<sup>2</sup>/人,平均碳足迹深度为1.05。

由上述可知,基于碳足迹广度、深度的空间耦合评价结果与传统的碳足迹相比,碳足迹广度和深度能以更 丰富的内涵解释生态持续性的性质差异,尤其是后者对可持续的显著影响。例如:从二维指标看,宁夏、河北、 山西、山东 17年的碳赤字平均值相似,介于 0.35—0.47 hm<sup>2</sup>/人,居于 3—6位,碳排放造成的生态压力相差不 大;从三维指标看,4个省区的碳足迹广度分别以 0.29 hm<sup>2</sup>/人、0.10 hm<sup>2</sup>/人、0.21 hm<sup>2</sup>/人、0.02 hm<sup>2</sup>/人居于 8、 23、15、27位,碳足迹深度分别以 2.76、5.31、2.90、15.58 居于 9、6、8、4位,其中河北、山东较小的碳足迹广度和 较大的碳足迹深度揭示了其吸纳碳排放以存量资本消耗为主且生态持续性较弱的局面,而宁夏碳足迹广度和 深度排名差距较小,自然资本流量、存量双重利用,生态持续性强于河北和山东,相对来说山西生态持续性强 于河北、山东却弱于宁夏。因此碳排放与碳汇之间的矛盾在碳足迹三维指标下能得到更直观的反映,更加明 断了能源消费的碳排放对生态环境的影响规模,可一定程度上弥补传统碳足迹评估的不足。

还可得知,基于碳足迹广度、深度的空间耦合评价结果与中国资源禀赋和经济发展水平的空间格局大致

吻合。大多经济发展水平高、人口密度大的区域碳源很大程度超前于碳汇,加之对生态环境的扰动较剧烈,使 得森林、草地向建设用地转化,生态系统的碳储量也随此地表过程而减少,进而导致区域呈碳足迹广度小、深 度大的空间格局;针对此现状问题,该类区域吸纳碳排放应扩大自然资本流量占用,即注重保护或适度扩大森 林和草地面积、增强碳汇,此举措对其碳循环系统压力的减弱潜力可能会远大于碳汇能力较强的区域,另外, 利用区域的经济和技术水平优势,承担更多的碳减排责任,加大控制碳排放,降低自然资本存量消耗,对于协 调区域碳平衡有重要作用。大多经济发展水平低、人口密度小的区域碳源未超过或微超过碳汇,生态系统固 碳能力强,区域呈碳足迹广度大、深度小的空间格局,该类区域提升改造传统工业、培育新兴产业、转变经济发 展方式以控制和降低碳排放量,可进一步减弱碳循环系统压力。

#### 4 结论

本文将能源消费产生的碳排放整合为土地面积量纲,且在碳平衡视角下强调碳排放对于自然资本存量耗 竭及生态持续性的影响。研究结果如下:

(1)2000—2013年中国碳足迹经历了一个明显上升的过程,但在2013年后出现小幅下降;中国碳生态承载力受森林、草地资源变动的影响,呈波动下降趋势。碳足迹高值区主要集中于煤炭资源丰富和经济密集区 (如宁夏、上海),碳生态承载力高值区集中于森林、草地面积广阔地区。

(2)2000—2007年中国碳足迹广度与碳足迹挂钩,呈波动上升趋势,2008年后与碳生态承载力挂钩,呈 波动下降趋势,自然资本流量已被完全占用且流动性不断缩小。高值区集中于西北、西南和东北地区,其主要 依靠自然资本流量吸纳区域碳排放;低值区集中于东部沿海和中部,其流量资本已不足以补偿碳排放。

(3)2008年后中国碳足迹深度超过自然原长1,表现为先上升后下降的阶段化特征。研究期内碳足迹深度始终处于自然原长1的有内蒙古、黑龙江等10个省区;东部沿海和中部地区的碳足迹深度较高,尤其是上海可达298.83,碳循环系统承受巨大压力,生态持续性弱。

(4)中国碳足迹广度、深度具有显著的空间正相关特征。碳足迹广度 H-H 集聚分布于东北和西北地区, L-L 集聚由东部沿海向中部扩散;H-H 集聚减弱,L-L 集聚增强。碳足迹深度 H-H 集聚集中于中部及东部沿 海地区,L-L 集聚覆盖了 18 个地区;H-H 集聚增强,L-L 集聚减弱。

本文计算的碳足迹仅考虑了终端能源消费产生的碳排放,由于数据限制,未考虑电力和农村生物质能消费产生的碳排放;计算的碳生态承载力,其中碳净积累量采用的是全球平均值,而不同区域森林和草地类型、质地存在差异,进而碳净积累量也有所不同,这些会一定程度上影响计算结果的精度,未来有必要对区域碳足迹和碳生态承载力进行精确核算。另外本文仅评价分析了区域碳足迹广度、深度的时空格局,对于格局形成的驱动因素和内在机制也有待深入探讨。

#### 参考文献(References):

- [1] 程叶青,王哲野,张守志,叶信岳,姜会明.中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量.地理学报,2013,68(10):1418-1431.
- [2] 黄雨生,曲建升,刘莉娜.中国各省份碳足迹与碳承载力差异研究.生态经济,2016,32(6):38-43.
- [3] Wackernagel M, Ress W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Philadelphia, PA: New Society Publishers, 1996.
- [4] 胡小飞,邹妍,傅春.基于碳足迹的江西生态补偿标准时空格局.应用生态学报,2017,28(2):493-499.
- [5] 彭文甫,周介铭,徐新良,罗怀良,赵景峰,杨存建.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局.生态学报,2016,36 (22):7244-7259.
- [6] 焦文献,陈兴鹏,贾卓.甘肃省能源消费碳足迹变化及影响因素分析.资源科学,2012,34(3):559-565.
- [7] 张南,李楠,刘一,王震. 生态设计家具的碳足迹核算与减排效果分析——以木质家具为例. 生态学报, 2016, 36(22): 7235-7243.
- [8] Mujica M, Blanco G, Santalla E. Carbon footprint of honey produced in Argentina. Journal of Cleaner Production, 2016, 116: 50-60.
- [9] 刘晔, 刘丹, 张林秀. 基于收入和消费差异的中国城镇居民碳足迹研究. 生态科学, 2016, 35(1): 194-199.
- [10] Steen-Olsen K, Wood R, Hertwich E G. The carbon footprint of Norwegian household consumption 1999-2012. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(3): 582-592.

- [11] 张丹,成升魁,高利伟,刘晓洁,曹晓昌,刘尧,白军飞,许世卫,俞闻,秦奇.城市餐饮业食物浪费碳足迹——以北京市为例.生态学报,2016,36(18):5937-5948.
- [12] Zhang W S, He X M, Zhang Z D, Gong S, Zhang Q, Zhang W, Liu D Y, Zou C Q, Chen X P. Carbon footprint assessment for irrigated and Rainfed maize (*Zea mays L.*) production on the Loess Plateau of China. Biosystems Engineering, 2018, 167: 75-86.
- [13] Benjaafar S, Li Y Z, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.
- [14] 赵荣钦,黄贤金.基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹.地理研究, 2010, 29(9): 1639-1649.
- [15] 赵先贵, 马彩虹, 肖玲, 纪芙蓉. 陕西省碳足迹时空变化研究. 地理科学, 2013, 33(12): 1537-1542.
- [16] 吴文佳, 蒋金亮, 高全洲, 蒋海兵. 2001—2009年中国碳排放与碳足迹时空格局. 生态学报, 2014, 34(22): 6722-6733.
- [17] 卢俊宇,黄贤金,陈逸,肖潇.基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析.地理研究, 2013, 32(2): 326-336.
- [18] 黄晓敏,陈长青,陈铭洲,宋振伟,邓艾兴,张俊,郑成岩,张卫建. 2004—2013 年东北三省主要粮食作物生产碳足迹.应用生态学报, 2016,27(10):3307-3315.
- [19] 丰霞,智瑞芝,董雪旺.浙江省居民消费间接碳足迹测算及影响因素研究.生态经济,2018,34(3):23-30.
- [20] 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 周新 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移. 地理学报, 2012, 67(10): 1327-1338.
- [21] Schwartz Y, Raslan R, Mumovic D. The life cycle carbon footprint of refurbished and new buildings: a systematic review of case studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(1): 231-241.
- [22] 梁中, 徐蓓. 中国省域碳压力空间分布及其重心迁移. 经济地理, 2017, 37(2): 179-186.
- [23] Zhang D, Shen J B, Zhang F S, Li Y E, Zhang W F. Carbon footprint of grain production in China. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4126.
- [24] Sommer M, Kratena K. The carbon footprint of European households and income distribution. Ecological Economics, 2017, 136: 62-72.
- [25] Yu M, Wiedmann T, Crawford R, Tait C. The carbon footprint of Australia's construction sector. Procedia Engineering, 2017, 180: 211-220.
- [26] Chen G W, Wiedmann T, Wang Y F, Hadjikakou M. Transnational city carbon footprint networks-exploring carbon links between Australian and Chinese cities. Applied Energy, 2016, 184: 1082-1092.
- [27] 王钰乔, 濮超, 赵鑫, 王兴, 刘胜利, 张海林. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势. 资源科学, 2018, 40(9): 1800-1811.
- [28] 姚亮,刘晶茹,袁野.中国居民家庭消费碳足迹近 20 年增长情况及未来趋势研究.环境科学学报, 2017, 37(6): 2403-2408.
- [29] 庞军,高笑默,石媛昌,孙文龙.基于 MRIO 模型的中国省级区域碳足迹及碳转移研究.环境科学学报,2017,37(5):2012-2020.
- [30] 李伯华,刘云鹏,窦银娣. 旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估及影响因素分析——以南岳衡山为例. 资源科学, 2012, 34(5): 956-963.
- [31] 赵荣钦,黄贤金,钟太洋.中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析.地理学报,2010,65(9):1048-1057.
- [32] 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.
- [33] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.
- [34] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯蓉, 胡安焱. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹. 生态学报, 2008, 28(4): 1729-1735.
- [35] 郑德凤,刘晓星,王燕燕,吕乐婷.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.地理科学进展,2018,37(10): 1328-1339.
- [36] 方恺, Reinout H. 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.
- [37] 关伟,许淑婷.中国能源生态效率的空间格局与空间效应.地理学报,2015,70(6):980-992.