

DOI: 10.5846/stxb201910292267

王业宁, 周强, 王豪伟. 中国 34 个省级行政区三维生态足迹动态研究. 生态学报, 2020, 40(18): 6434-6444.

Wang Y N, Zhou Q, Wang H W. Assessing three-dimensional ecological footprint of 34 provinces in China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6434-6444.

中国 34 个省级行政区三维生态足迹动态研究

王业宁^{1,2}, 周强^{1,2}, 王豪伟^{1,*}

1 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 当前中国正处于生态文明建设的关键时期, 东西部环境资源不均衡的格局日益加剧, 限制了区域社会经济的可持续发展。基于资源、社会经济统计数据, 利用三维生态足迹模型对中国 34 个省级行政区进行动态研究, 细化不同类型土地的均衡因子与产量因子, 刻画 2009—2016 年人均生态足迹广度、生态足迹深度的时空特征, 并探讨分析省域间的资本利用格局及其社会经济影响因素。主要结论如下: 人均生态足迹广度在省域间差异较大, 且生态足迹深度均已超过自然原长 1.00; 足迹广度在研究期间呈先降后升趋势, 最高值为西藏的 10.87—12.35 hm^2/cap , 最小值为澳门的 0.02 hm^2/cap ; 且资本流量占用率并不充足, 广西与上海分别仅为 47.68%—67.34%、66.31%—68.88%。香港、澳门、宁夏的足迹深度远高于中国均值, 分别为 19.24—26.02、8.60—10.88、4.60—7.46, 最小值为西藏(1.64—1.79), 其中耕地、化石能源用地的生态赤字贡献率最高, 而林地则为生态盈余状态。将各省自然资本利用格局聚类分为 4 类并通过 ArcGIS 进行空间分析。基于改进的三维生态足迹模型并系统性地应用于中国 34 个省域, 本研究量化各省的自然资本利用格局, 可为中国区域间资源配置、政策制定提供基础数据支撑及环境决策参考。

关键词: 生态足迹广度; 生态足迹深度; 生态承载力; 三维生态足迹; 中国

Assessing three-dimensional ecological footprint of 34 provinces in China

WANG Yening^{1,2}, ZHOU Qiang^{1,2}, WANG Haowei^{1,*}

1 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Under the construction of ecological civilization in China, the contradiction between resource depletion and sustainable development is becoming a crucial issue nowadays. Based on resources and socioeconomic statistics, this paper applied the modified three-dimensional ecological footprint (3DEF) model to analyze and evaluate natural capital utilization in China during 2009—2016. The results showed that ecological footprint size (EF_{size}) differed within 34 provinces and ecological footprint depth (EF_{depth}) far exceeded the original value of 1.00. EF_{size} per capita decreased first and then increased with obvious spatial heterogeneity in 34 provinces. The highest EF_{size} was in Tibet (10.87—12.35 hm^2/cap) and the lowest in Macao (0.02 hm^2/cap), while natural capital flow ratios were greatly insufficient in Guangxi (47.68%—67.34%) and Shanghai (66.31%—68.88%). The highest EF_{depth} occurred in Hong Kong (19.24—26.02), followed by Macao (8.60—10.88) and Ningxia (4.60—7.46), which were extremely above the average of China while Tibet registered the lowest value (1.64—1.79). Cropland and fossil energy land contributed the most to total ecological deficit while woodland component maintained in ecological surplus state during the study period. Spatial patterns of natural capital

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA23030103); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501101); 国家自然科学基金项目 (41571148)

收稿日期: 2019-10-29; 网络出版日期: 2020-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hwwang@iue.ac.cn

utilization in 34 provinces were divided into four categories through clustering analysis integrated with ArcGIS software. The significance of this research is optimizing 3DEF model applied to 34 provinces in China systematically. The investigation also quantitatively depicted natural capital flow and stock utilization on provincial scale and further explored their influencing socioeconomic factors. Overall, our findings could provide basic data and guidance for decision-makers to establish regional sustainability strategies in China.

Key Words: ecological footprint size; ecological footprint depth; ecological carrying capacity; three-dimensional ecological footprint; China

当前,中国正处于生态文明建设的关键时期,东西部自然资源不均衡、不协调的格局日益加剧,限制了区域社会经济的可持续发展,甚至危及国家的生态安全^[1]。作为评估区域可持续发展的有效工具,生态足迹模型受到政府与学界的广泛关注^[2-3]。生态足迹概念于 1992 年由加拿大生态经济学家 Wackernagel 等提出^[4],被定义为生产一定人口所消费资源和吸纳废弃物所需要的生物生产土地的总面积,将能够提供的生物生产性土地总面积定义为生态承载力,通过对比供需间的差距以评价研究区的可持续发展状况。生态足迹小于生态承载力时称为生态盈余,反之为生态赤字。全球平均而言,生态承载力低于生态足迹,2012 年需 1.6 个地球方能满足人类所需^[5],并将导致资源存量的过度消耗^[6-7]。徐中民等^[8]基于统计数据得出 1999 年中国的生态赤字达到 0.65 hm²/cap,同 Wackernagel 等^[4]计算结果相比,生态足迹增加了 0.13 hm²/cap,且大部分省份的生态足迹已超过当地的生态承载力。Yang 等^[9]基于能源生态足迹模型对中国进行生态安全评价,表明东部沿海省份的生态压力将有所减小,而西部地区却呈恶化趋势,且生态状况与经济发展在空间上不均衡^[10-11]。

传统的生态足迹模型未能区分自然资本流量与存量,也无法反映生态赤字在世代上的累积^[12]。Niccolucci 等^[13-14]引入足迹广度和足迹深度构建三维生态足迹模型,以表征资本流量和存量的使用状况。方恺等^[15]将其引入中国并进行优化与完善,构建资本流量占用率和存量流量利用比两个指标,并评估全球 11 个国家的自然资本利用状况^[16]。杨屹与樊明东^[17]分析中国丝绸之路经济带沿线省份的生态压力指数及足迹广度与深度的时空特征,并采用基尼系数、经济贡献系数构建公平性评价模型。学者评估区域资本流量和存量的占用及不同类型土地的差异性,探讨生态足迹广度与深度的驱动因素,揭示了社会经济发展与生态足迹之间的关系^[18-19]。

中国幅员辽阔,自然资源禀赋与社会经济发展水平差异较大,自然资本利用的强度与结构具有明显的空间异质性^[20]。基于三维生态足迹模型,本文首先计算中国 34 个省级行政区的均衡因子与产量因子以提升模型可靠性^[11, 21],刻画不同类型土地的生态足迹广度与深度的时空特征,并根据生态足迹与社会经济的关系探索其影响因素,为中国及各省的资源利用、产业结构调整、生态补偿政策等提供基础数据与决策参考。

1 研究区概况

中华人民共和国(中国)领土陆地面积约 960 万 km²,下辖 23 个省份、5 个自治区、4 个直辖市和 2 个特别行政区(为研究表示方便,下统称为省份),如图 1。中国地势西高东低,山地、高原和丘陵约占陆地面积的 67%,盆地和平原约占 33%;大部分地区属于温带、副热带季风气候,地理景观与气候形态丰富多样,有冰川、丹霞、沙漠、喀斯特等多种地貌。东临太平洋,领海由渤海(内海)以及黄海、东海、南海三大边海组成,海域面积约 473 万 km²。中国是世界上人口最多的国家,约有 13.9 亿人。土地资源数量大,人均占有少,且地区分布不均,生产力空间差异显著。2018 年国内生产总值(GDP)约为 90 万亿元,稳居世界第二位。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

数据来源主要为《中国统计年鉴》、《台湾统计年鉴》、《香港统计年刊》、《澳门统计年鉴》、《国际统计年

鉴》、《农业技术经济手册(修订版)》、粮农组织数据库、土地利用数据等,时间跨度为2009—2016年。计算生态足迹主要为生物质和能源两部分,涉及生物质产品包括农产品、畜产品、林产品、水产品;能源类为煤炭、石油、天然气、电力等,具体见表1。所有生物质采用生产量,能源类则用消费量,以真实表征当地的生态环境压力^[22-23],故不需计算进出口贸易调整量。人口、GDP等数据来自各省域的统计数据,因研究区域数据量较大,无法获取的数据则采用相邻年份数据作近似处理。

土地类型面积来源于自然资源部土地调查成果共享应用服务平台(http://tddc.mlr.gov.cn/to_Login)、港澳台的统计年鉴及全球土地覆盖产品^[24],根据生态足迹内涵及《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)作如下调整,耕地、草地分别为耕地、草地,园地与林地合并为林地,城镇村及工矿用地与交通运输用地合并为建设用地,水域及水利设施用地作为水域,考虑到中国是世界上唯一养殖产量远超过捕捞产量的渔业国家,且各省份的海水养殖面积难以获取,故而未将海域面积纳入生态足迹模型;暂不考虑其他类型土地(如沼泽地、沙地等)。

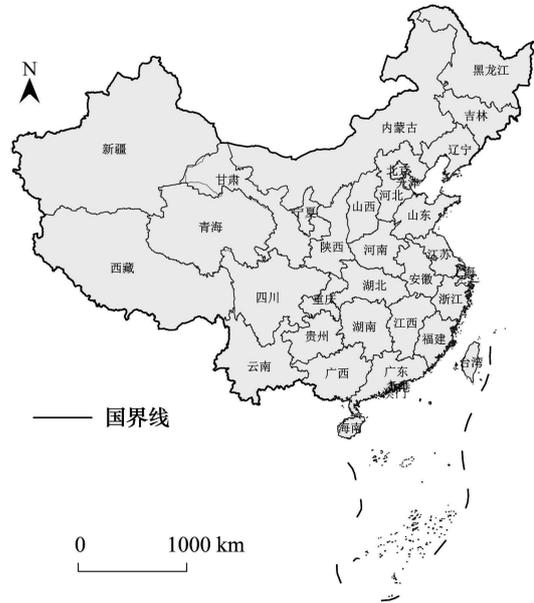


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

表1 生态足迹模型选用的生物能源数据

Table 1 Biological and energy resource data selected for ecological footprint model

土地类型 Land categories	生物产量/能源消费量 Biological products/Energy consumption items
耕地 Cropland	稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类、棉花、油料、麻类、甜菜、甘蔗、烟叶、蔬菜、猪肉、禽蛋 Rice, Wheat, Maize, Beans, Tubers, Cotton, Oil-bearing crops, Fiber crops, Beetroots, Sugarcane, Tobacco, Vegetables, Pork, Poultry eggs
草地 Grassland	牛肉、羊肉、牛奶、羊毛、羊绒 Beef, Mutton, Milk, Wool, Cashmere
林地 Woodland	茶叶、蜂蜜、水果、木材、橡胶、松脂、生漆、油桐籽、油茶籽 Tea, Honey, Fruits, Timber, Rubber, Pine resin, Lacquer, Tung-oil seeds, Tea-oil seeds
水域 Water area	鱼类、虾蟹类、贝类、藻类 Fish, Shrimps, Shellfish, Algae
化石能源用地 Fossil energy land	煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气 Coal, Coke, Crude oil, Gasoline, Kerosene, Diesel oil, Fuel oil, Natural gas
建设用地 Construction land	电力 Electricity

2.2 研究方法

生态足迹分为耕地、草地、林地、水域、化石能源用地、建设用地等六部分,利用均衡因子与产量因子汇总合并至同一土地单位。计算公式^[4, 25]如下:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_i (ef_i \times r_i) = N \times \sum_i \sum_j \left(\frac{C_{ij}}{P_{ij}} \times r_i \right) \quad (1)$$

$$r_i = \frac{\sum_j (C_{ij} \times \gamma_{ij})}{S_i} / \frac{\sum_i \sum_j (C_{ij} \times \gamma_{ij})}{\sum_i S_i} \quad (2)$$

式中, EF 为研究区总生态足迹 (hm^2); N 为总人口 (cap); ef 为人均生态足迹 (hm^2/cap); i 为土地类型; ef_i 为第 i 类土地的生态足迹 (hm^2/cap); r_i 为第 i 类土地的均衡因子; j 为生物质生产或消费项目; C_{ij} 为研究区第 i 类土地第 j 种项目的生产量或消费量 (kg 或 m^3 或 kW h); P_{ij} 为全球第 i 类土地第 j 种项目的平均生产量或消费量 (kg/hm^2 或 m^3/hm^2 或 $\text{kW h}/\text{hm}^2$); γ_{ij} 为第 i 类土地第 j 种项目的单位热值 (kJ/kg 或 kJ/m^3 或 $\text{kJ}/\text{kW h}$); S_i 为研究区第 i 类土地面积 (hm^2)。

生态承载力计算公式如下:

$$EC = N \times ec = N \times \sum_i (S_i \times r_i \times \gamma_i) \quad (3)$$

$$\gamma_i = \frac{\sum_j (C_{ij} \times \gamma_{ij})}{S_i} / \frac{\sum_j (C'_{ij} \times \gamma_{ij})}{S'_i} \quad (4)$$

式中, EC 为研究区生态承载力 (hm^2); ec 为人均生态承载力 (hm^2/cap); γ_i 为第 i 类土地的产量因子; C'_{ij} 为研究区上一级行政区第 i 类土地第 j 种项目的生产量或消费量 (kg 或 m^3 或 kW h); S'_i 为研究区上一级行政区第 i 类土地的生物生产面积 (hm^2)。以各省份逐年实际土地产出能力作为基准计算均衡因子、产量因子,充分体现中国自然资源的空间异质性。因香港、澳门地区的生物质、能源基本上依赖外地输入,故选用临近地区即广东省的均衡因子、产量因子以避免零值计算。

基于上述模型,引入足迹广度与深度以表征资本流量占用和存量消耗。公式^[13, 16]如下:

$$EF_{\text{size}} = N \times ef_{\text{size}} = N \times \sum_i \min \{ ef_i, ec_i \} \quad (5)$$

$$EF_{\text{depth}} = ef_{\text{depth}} = 1 + \frac{\sum_i \max \{ ef_i - ec_i, 0 \}}{\sum_i ec_i} \quad (6)$$

$$EF_{3D} = EF_{\text{size}} \times EF_{\text{depth}} \quad (7)$$

式中, EF_{size} 、 EF_{depth} 、 EF_{3D} 分别为生态足迹广度 (hm^2)、足迹深度和三维生态足迹 (hm^2); ef_{size} 、 ef_{depth} 分别为人均生态足迹广度 (hm^2/cap) 与深度。较小的足迹广度与较大的足迹深度表明区域可持续能力较弱,反之则较强。

引入 Shannon-Wiener 指数以表征不同类型土地需求与供给的均衡性,公式^[26]如下:

$$H_{ef} = - \sum_i (P_i^{ef} \times \ln P_i^{ef}) \quad (8)$$

$$H_{ec} = - \sum_i (P_i^{ec} \times \ln P_i^{ec}) \quad (9)$$

式中, H_{ef} 、 H_{ec} 分别为 ef 和 ec 的 Shannon-Wiener 指数, P_i^{ef} 、 P_i^{ec} 为 ef_i 、 ec_i 的占比,若研究区内各类土地占比均衡,则 H_{ef} 、 H_{ec} 应分别为最高值 $\ln 6$ 、 $\ln 5$ 。

3 结果分析

3.1 生态足迹广度

生态足迹广度表征自然资本流量占用的状况,因资源禀赋的不均衡性,中国 34 个省的人均足迹广度具有明显的空间异质性(图 2)。高值区主要分布于人口密度低的东北、西北地区,低值则位于人口稠密的华东、华北地区。中国人均足迹广度呈先降后升趋势,年际波动幅度很小,各省份间的差异较为明显。西藏的足迹广度最大,从 2009 年的 $10.87 \text{ hm}^2/\text{cap}$ 波动上升至 2016 年的 $12.35 \text{ hm}^2/\text{cap}$;其次是青海,从 2009 年的 $5.76 \text{ hm}^2/\text{cap}$ 下降至 2016 年 $4.73 \text{ hm}^2/\text{cap}$,年均降低 2.78%;内蒙古、黑龙江等省份也高于中国逐年平均值 $0.98 \text{ hm}^2/\text{cap}$ 。香港、澳门两个特区最低,分别为 $0.03 \text{ hm}^2/\text{cap}$ 、 $0.02 \text{ hm}^2/\text{cap}$,研究期间基本无波动。资本流量占用率的空间差异性显著,最低为广西(47.68%—67.34%)与上海(66.31%—68.88%),其人均生态足迹广度较低,大部分林草地资源尚有流量未被占用,但总体上仍处赤字状态;最高为青海(96.48%—100.00%)、内蒙古(91.53%—97.80%),其人均资本流量处于第二、三位,且基本处于完全占用。

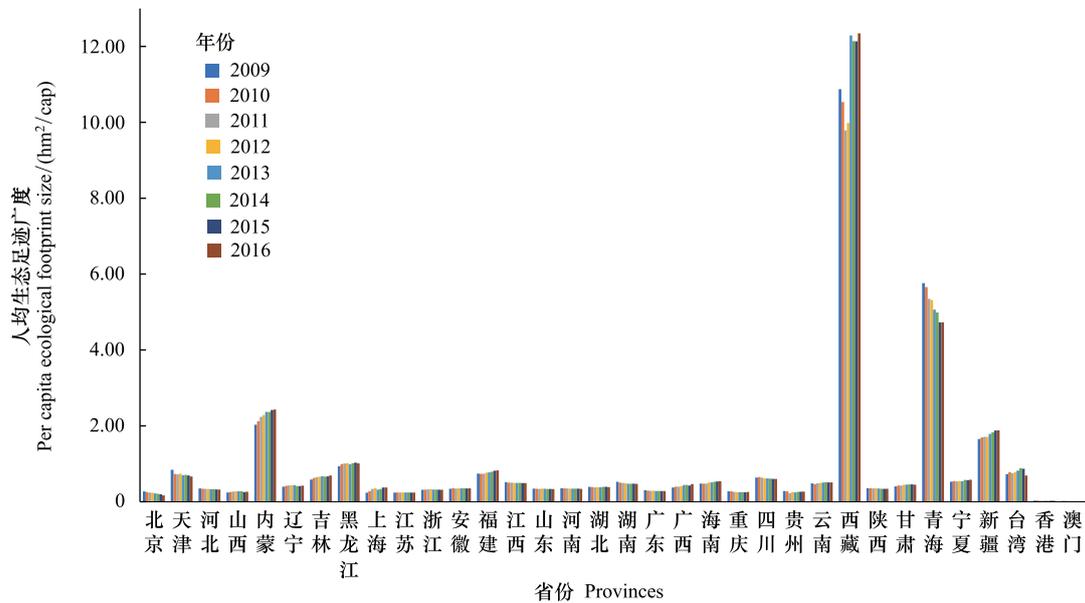


图2 中国各省的人均生态足迹广度

Fig.2 Ecological footprint size (EF_{size}) per capita of 34 provinces in China

不同土地利用类型的生态足迹广度作进一步分析(图3)。中国各省的足迹广度在土地类型组分中贡献度不同,大致可分为4类。西藏、四川、湖南等大部分省份的耕地足迹占绝对优势,占比为75.00%以上,主要因素是人口密度低,耕地面积较为充足;天津、上海两个直辖市的草地足迹占比较高,分别达到89.49%—87.31%、63.20%—88.73%,后者年际波动较大,与极高的均衡因子、产量因子有关,草地单位面积产量相对较高,且其建设用地(19.08%—9.82%)、耕地(16.19%—5.91%)占比均呈下降趋势。北京的草地足迹占比为38.69%—47.82%,仍高于建设用地和耕地,其建设用地占比稳定上升,耕地占比则波动下降,与其高速城镇化直接关联;福建、海南、台湾等毗邻海域的省份其水域足迹占优势,逐年平均占比为51.97%—55.69%,耕地、草地次之,该类省份气候温和湿润,无霜期长,适合稻谷、茶叶的种植,农牧渔业均较发达;香港、澳门的建设用地占比较大,表明其城市化程度已为高度发达,而其资源则严重依赖外地输入。由于城市化进程加速,各省均面临耕地、林地、草地减少的压力,应加强科技创新以提升物质生产与资源利用效率。Shannon-Wiener指数最高的省份为山东、浙江、海南等,其疆域毗邻江海,陆地、水域面积均较大,可利用土地类型的均衡性较强;最低的省份主要分布于西部地区,受地形、气候等限制,高原山地丘陵较多,其可利用土地类型单一,耕地赤字相对较大,足迹广度组分均衡性较弱,自然资源的开发利用仍有较大潜力。

3.2 生态足迹深度

生态足迹深度表示资本存量的消耗程度,当资本流量不足以维持地区的可持续发展,则转为消耗存量,此时足迹深度大于自然长度。在34个省份中,足迹深度均超过1.00(图4),且大多数省份超过同期的全球足迹深度(2.51—2.60)^[5, 14]。足迹深度高值区分布于东北、华东、华北地区,中值区主要分布于中西部,低值区则分布于西南、华南地区。研究期间西藏、黑龙江、台湾是足迹深度最小的省份,分别为1.64—1.79、1.87—1.94、1.81—1.98;香港、澳门、宁夏是深度最大的省份,分别为19.24—26.02、8.60—10.88、4.60—7.46。时间序列上,大部分省域的足迹深度呈持续增加趋势,辽宁、浙江、台湾等基本无波动,内蒙古、吉林、上海呈下降趋势,河南、广西、云南等则呈先升后降的趋势。

在足迹深度的组分上,黑龙江、江西、重庆等耕地赤字组分占比较大,上海、香港等化石能源用地赤字占绝对优势。北京、上海、香港、澳门等高度发达的城市及贵州、青海等人口较小的省份其建设用地组分逐渐呈赤字状态,大部分省域仍处于盈余,表明中国各地城市化进程均在加速,尚有部分富余的可利用土地。山西、内

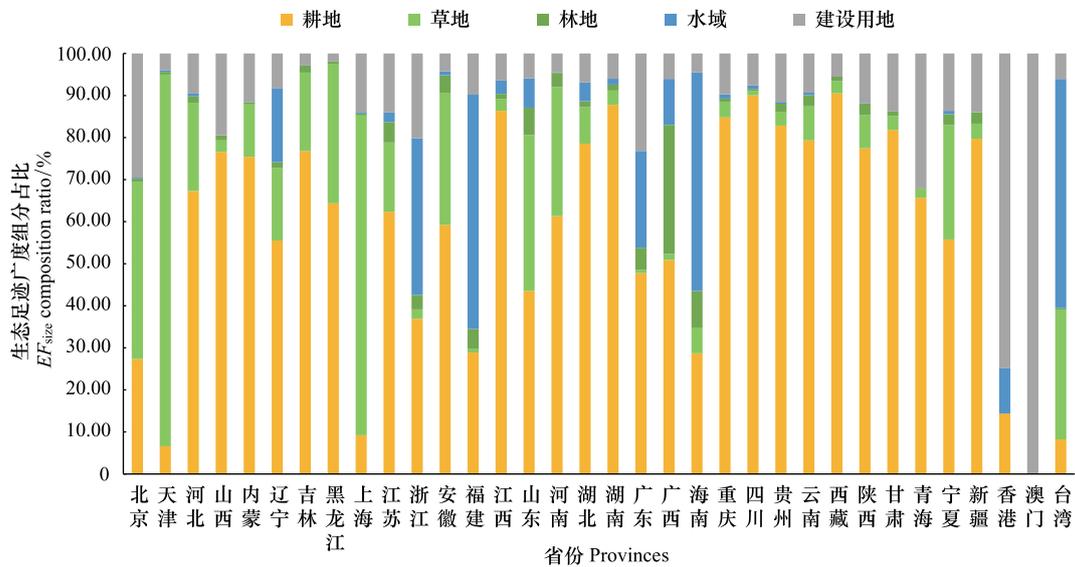


图 3 中国各省域生态足迹广度组分占比

Fig.3 EF_{size} composition ratio of 34 provinces in China

蒙古、天津、江苏等省的能源足迹均处于高值,前两者为煤炭、石油等化石能源输出地,因人口少呈较高赤字;后两者则属于能源高消费地区,能源足迹赤字较高,但仍将间接增加西部能源基地的生态压力。天津与北京的煤炭消费量比值由 2009 年的 1.55 倍增至 2016 年的 4.99 倍,焦炭比值由 4.10 倍增至 4225.19 倍,其能源足迹远高于北京,足迹深度仅略高于北京,与耕地、草地的均衡因子与产量因子较低有关。各省的林地基本上均呈生态盈余,林产品产量一直控制在承载能力内,受益于退耕还林、森林资源保护等政策。

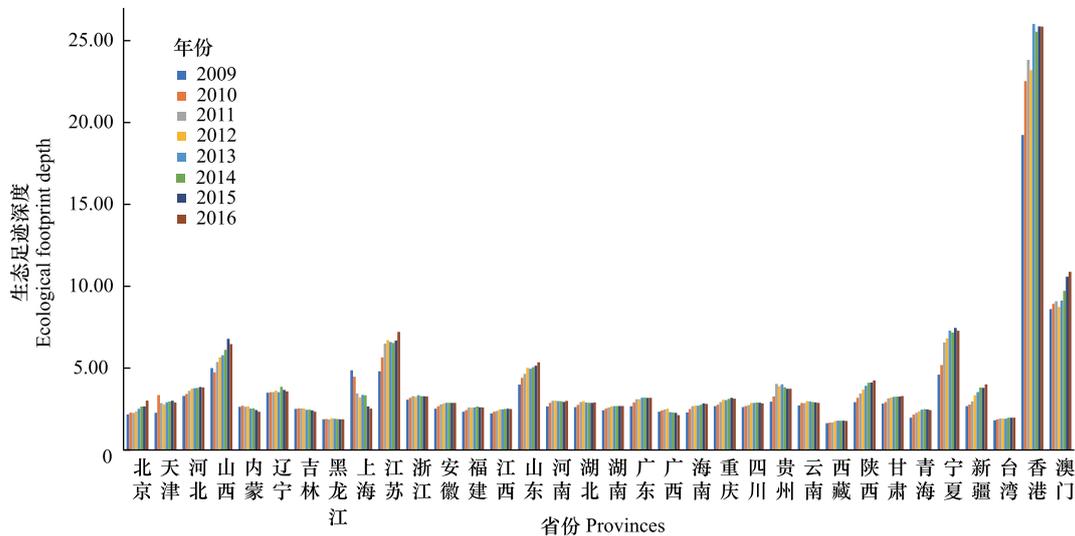


图 4 中国各省生态足迹深度

Fig.4 Ecological footprint depth (EF_{depth}) of 34 provinces in China

3.3 三维生态足迹

人均三维生态足迹表征自然资本的需求量,高值区分布于人口密度低的西藏、青海、宁夏等,低值则位于人口稠密的澳门、北京、香港等,各省间的差异较显著,且大部分地区呈增加趋势。西藏的人均三维生态足迹

最高,从 2009 年的 17.83 hm^2/cap 波动降至 2012 年的 17.66 hm^2/cap ,又激增至 2013 年的 22.03 hm^2/cap ,与其协同增长的足迹广度与深度有关;青海、内蒙古呈先增后降的趋势,新疆、陕西等大多数省域呈持续上升趋势,仅上海、北京、澳门等逐年下降,与本地生物质产出量降低有关,但其足迹则通过资源流通而转移至外地。

单位 GDP 的生态足迹可表征资本的利用效率,以万元 GDP 作为评价单元,计算万元 GDP 三维生态足迹,发现 34 个省份的万元 GDP 足迹在研究期间均下降,空间上“自西向东、由北至南”呈显著的降低趋势,侧面反映出地区间的经济发展阶段。西藏、青海的万元 GDP 足迹远高于其他省份,与其较低的人均 GDP 直接关联,表明其仍属于粗放型经济,主要依赖广袤的土地资源置换第一、二产业 GDP,但在研究期间其降低幅度最为明显,分别为 11.96—6.30 $\text{hm}^2/\text{万元}$ 、5.85—2.66 $\text{hm}^2/\text{万元}$,表明土地资源的利用效率提升 1.90—2.20 倍,正在向绿色可持续发展过渡;澳门、香港、北京等第三产业发达的都市其万元 GDP 足迹最低(0.004—0.06 $\text{hm}^2/\text{万元}$),与足迹转移至外地省份有关,也侧面反映出本地较高的资源利用率。

3.4 资本利用空间格局

对中国各省自然资源利用的空间格局作进一步分析,34 个省域的人均足迹广度与深度具有明显互补性。西藏、青海等广度较高的省份其深度较小,而澳门、香港等则相反,与人口密度高度关联,且与本地自然地形、土地利用和社会经济状况的格局有关。以各省足迹广度与深度的中位数为基准,以评估各省间资本利用的差异性,将中国 34 个省的资本利用状况分为 4 类(图 5),并得到资本流量占用与存量消耗的空间格局(图 6),具体如下:

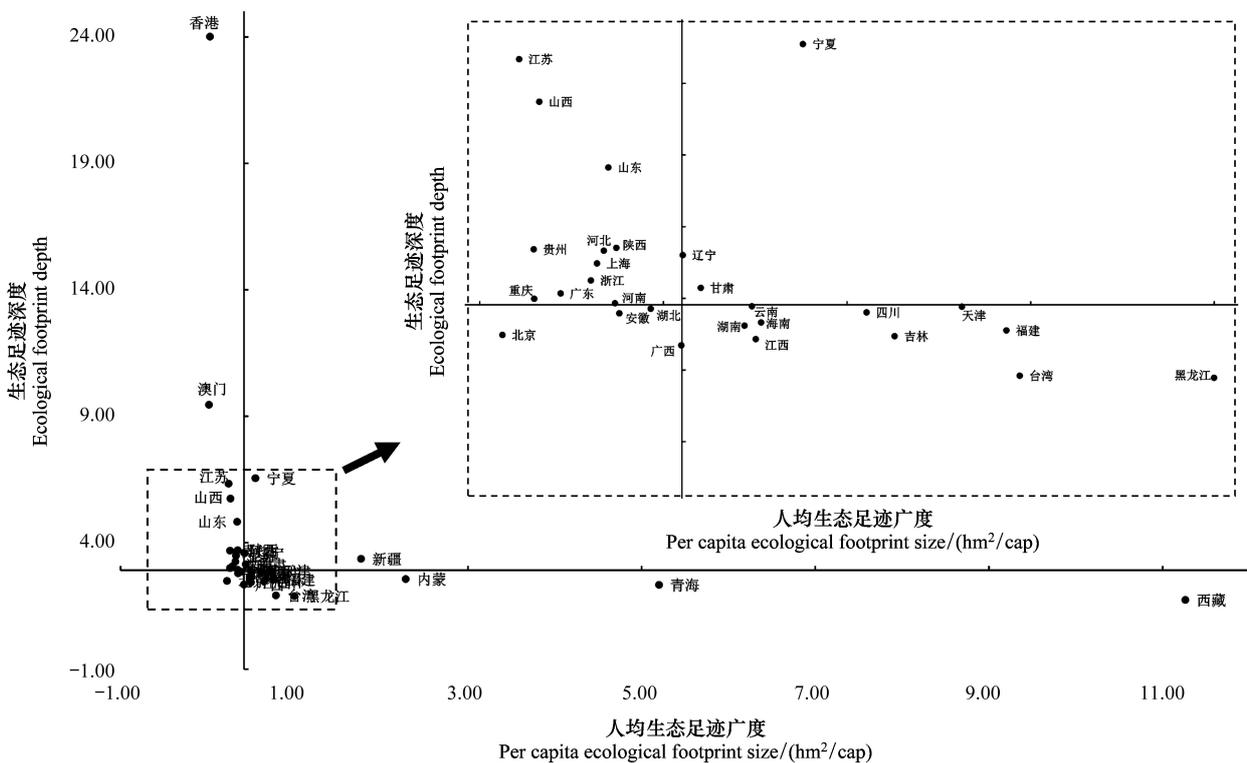


图 5 中国省域资本利用模式分类图

Fig.5 Classification of provincial capital utilization patterns in China

I: 资本存量重度消耗型。该类省份其足迹深度高且广度小,本地资本流量占用低,存量消耗程度高,包括香港、澳门 2 个特区,山西、河北 2 个华北省份,江苏、山东、上海、浙江等 4 个华东省份,贵州、重庆 2 个西南省份,以及陕西、广东、河南等共 13 个省份。此类省域人口密度较高,较低的资本流量难以维持可持续发展,本地资本存量消耗严重。该类型 13 个省份平均足迹广度仅为 0.26 hm^2/cap ,平均足迹深度达到 5.14—6.36。

II: 资本存量中度消耗型。该类省份足迹深度较高而广度较大,本地资本流量占用较高,存量消耗程度略

高。II 类区包括宁夏、新疆、甘肃、辽宁等 4 个省份,其土地面积大,但可利用资源受限,人口密度较低,人均资本流量相对较高,本地的存量消耗较为严重。4 个省份平均足迹广度为 0.75—0.83 hm^2/cap ,足迹深度为 3.40—4.55。

III:资本存量轻度消耗型,包括北京、安徽、湖北、广西等 4 个省份,其足迹深度(2.41—2.73)、广度(0.34—0.35 hm^2/cap)均较小,本地的资本存量消耗程度相对较低。

IV:资本存量微度消耗型,包括西藏、青海、内蒙古、黑龙江、台湾、福建、天津、吉林、四川、江西、海南、云南、湖南等 13 个省份,其平均足迹深度较低(2.26—2.50),足迹广度较大(1.83—2.02 hm^2/cap),本地的资本流量占用较高,减缓了资本存量的消耗程度。

研究期间部分省域的资本利用类型有所变化。河南从 2010 年由 III 类转为 I 类且持续至 2016 年,表明其资本流量占用不变而存量消耗加剧;北京在 2009—2015 年处于 III 类区,2016 年其足迹深度增至资本重度利用区;天津的存量消耗有所减缓,人口密度在 2012 年超过北京,但其足迹广度仍高于北京,逐渐由 II 类过渡为 IV 类区;云南、广西由资本中度利用类型改善为微度消耗型。

资本利用类型的空间格局具有明显的地域集聚性。I 类区集中于东部沿海及中原地区,社会经济发展水平较高。同时作为粮食的主产区,其本地生产性足迹压力较大,由于人口密度高,人均资本流量占用相对较低,存量消耗过多;II 类与 III 类呈零散分布,前者位于人口稀疏的西北地区,可利用土地较少,科技发展相对滞后,受制于自然禀赋,后者因人口稠密导致人均资源拥有量较低,主要受社会因素制约。IV 类则多为西南、北部省份,呈带状分布,人口密度较低,经济发展水平较低,资本利用呈流量高、存量低的趋势,主要受益于人均森林资源、牧草地、水域资源较为丰富。

3.5 讨论

资本利用格局与已有研究结果有所差异。张可云等^[27]采用经典模型计算中国 31 个省份的生产性生态足迹,方恺等^[28]利用三维足迹模型计算生产性足迹,并聚类分析 30 个省份的资本利用类型,其均衡因子与产量因子均直接采用全球公顷;Yang 等^[9]利用能源足迹模型评价 30 个省份生态压力的空间格局,自西至东由生态安全过渡为亚安全,上海与天津两市呈极不安全状态,与本文结果基本一致。较能源足迹模型的时空差异性更显著^[9],表明研究方法也是影响结果的重要因素^[29]。综合考虑物质生产与能源消费足迹,并将均衡因子与产量因子本地化^[22],本文更准确评估各省真实的生态压力,尤其是化石能源与建设用地的盈余/赤字状态。香港、澳门、北京、上海等高能耗大都市的资源基本靠外地输入,比如香港 2016 年蔬菜消费量为 85.00 万吨,而本地的生产量仅为 1.42 万吨,内地供港占其日常消费量的九成;澳门则完全靠服务业发展,生物质与能源严重依赖进口,但能源消费的足迹对当地仍产生生态压力,而碳足迹占比较大^[30]。中国能源消费结构中更多为煤炭、石油等非再生能源,且地域分布不均衡^[10],物质流通产生的足迹在生态评价中不能忽视^[31-32]。

各地区资本利用的同时应加强环境保护力度,改进资源开发、利用的效率,提高清洁能源的供应比例,向资源节约型与环境友好型社会发展模式转变^[33]。I 类区的广东、山东、河南、江苏其人口居中国前五位,是导致资本利用重度消耗的主要影响要素;而陕西、重庆、贵州等省的人口较低,但其生物质产出量较大,更多地辐射至周边省区如北京、香港等,属于生态足迹的“源”,在资源供需上应建立更高效合理的流通渠道^[32]。西部地区的人口密度增速较为明显,资本流量占用率逐年增加,社会经济的高度发展导致足迹深度有所增加,表明其资本存量消耗程度趋于严峻,但其可利用土地占据较大的开发优势,人均足迹广度仍有提升能力。作为中国第一、二大岛屿,且位于相似的地理位置,台湾的陆地面积约为海南的 1.06 倍,但人口是海南的 2.62 倍,其足迹深度不足海南的 3/4,资本利用效率显著高于海南,与其更合理的产业结构与土地利用规划有关。广西、福建等因夏季制冷、冬季取暖的能源消费量较低,资本存量消耗程度较弱,资本流量占用较高,在本地资源支撑下更具可持续性。随着城市化与居民生活方式的改变,大部分省份的生态足迹结构有所优化,可持续性有所增强^[34]。同时,发展人力资本如教育对于削减生态足迹有重要作用^[35],需加强该方面的研究。

生态足迹模型仍有数据库及方法的缺陷。首先需加强生态足迹源清单的完善,特别是国家、省份之间的

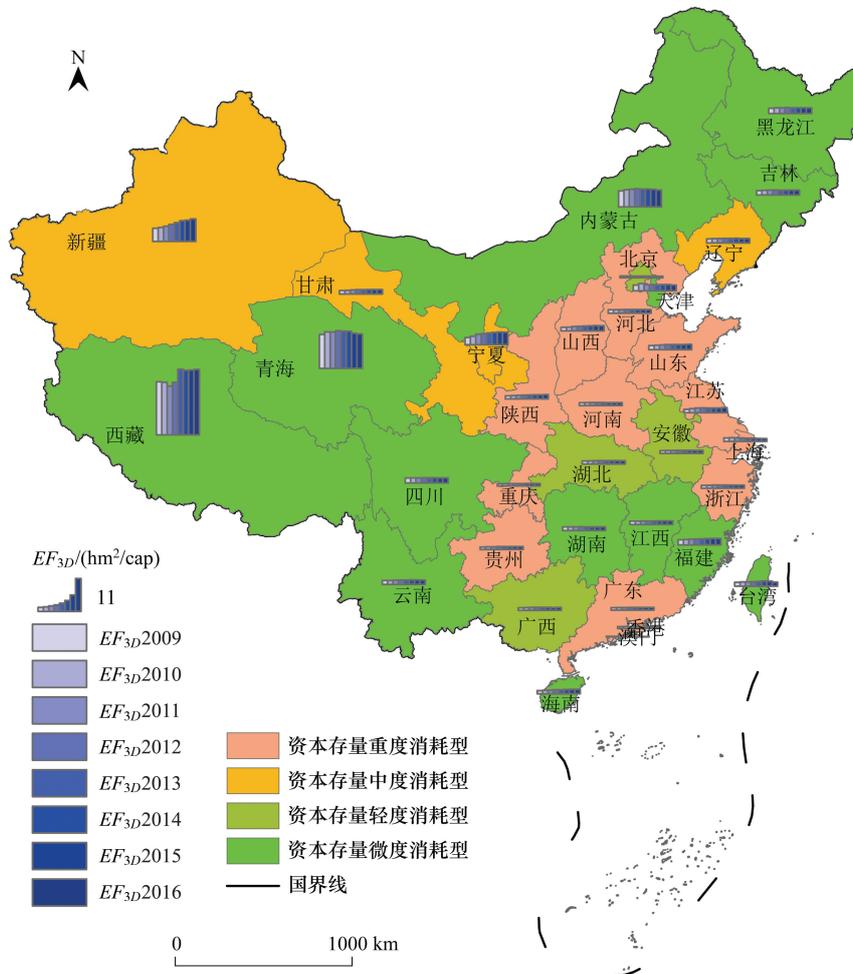


图 6 中国省域资本利用空间格局

Fig.6 Natural capital utilization patterns in China

贸易运输数据,通过空间大尺度的长时间序列研究,分析生态足迹的“源”与“汇”,可更准确地指导区域间的协调发展。同时,将人口年龄、性别、民族、受教育程度、货运量、居民消费等指标纳入模型,以提出更具可行性的政策建议。文中均衡因子与产量因子仅表征生物生产功能,未考虑生态系统提供的其他福利^[1, 20],比如沼泽地的气候调节、碳封存等功能,模型仍需进一步完善。

4 结论

基于改进的三维生态足迹模型,细化各省 2009—2016 年不同类型土地的均衡因子与产量因子,更准确地表明 34 个省份在中国相对的生态压力,对各省域的生态足迹广度与深度的时空特征进行刻画,探讨其社会经济的影响因素,并对自然资本利用的空间格局作了深入分析。主要结论如下:(1)各省在研究期间人均生态足迹广度差异较明显,高值区主要分布于东北、西北地区,低值区位于华东、华北地区,且六种类型土地组分的贡献度不同。Shannon-Wiener 指数较高的省份主要分布在沿海地区,其可利用土地类型的均衡性较强;(2)各省的足迹深度均超过自然原长,且呈持续增加趋势,高值区分布于东北、华东、华北地区,中值区主要为中西部省份,低值区位于西南、华南地区,耕地、化石能源用地组分的贡献率较高;(3)将 34 个省份的自然资本利用状况划分为资本存量重度、中度、轻度、微度消耗型等 4 类区,与其自然地形、土地利用和社会经济状况的空间格局有关,具有明显的地域集聚性;(4)各省域的万元 GDP 足迹在研究期间均有所下降,空间上呈“自西向

东、由北至南”的降低趋势,侧面反映出不同地域间的经济发展阶段,可为区域间生态补偿、环境管理政策的制定提供理论支撑与数据参考。

参考文献(References):

- [1] 赵景柱. 关于生态文明建设与评价的理论思考. 生态学报, 2013, 33(15): 4552-4555.
- [2] Graymore M L M, Sipe N G, Rickson R E. Sustaining human carrying capacity: a tool for regional sustainability assessment. *Ecological Economics*, 2010, 69(3): 459-468.
- [3] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, Erb K H, Haberl H, Krausmann F. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 271-278.
- [4] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfún I S L, Garcia J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [5] Global Footprint Network. National Footprint Accounts 2016 are out! Carbon makes up 60% of world's Ecological Footprint, 2016.
- [6] Kitzes J, Wackernagel M, Loh J, Peller A, Goldfinger S, Cheng D, Tea K. Shrink and share: humanity's present and future ecological footprint. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 467-475.
- [7] Lin D, Wackernagel M, Galli A, Kelly R. Ecological footprint: informative and evolving - a response to van den Bergh and Grazi (2014). *Ecological Indicators*, 2015, 58: 464-468.
- [8] 徐中民, 张志强, 程国栋, 陈东景. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280-285.
- [9] Yang Q, Liu G Y, Hao Y, Coscieme L, Zhang J Q, Jiang N N, Casazza M, Giannetti B F. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emergy-ecological footprint hybrid indicators. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 678-695.
- [10] Yang Y, Fan M D. Analysis of the spatial-temporal differences and fairness of the regional energy ecological footprint of the Silk Road Economic Belt (China Section). *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 1246-1261.
- [11] Wang Z H, Yang L, Yin J H, Zhang B. Assessment and prediction of environmental sustainability in China based on a modified ecological footprint model. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132: 301-313.
- [12] Zhang L, Dzakpasu M, Chen R, Wang X C. Validity and utility of ecological footprint accounting: a state-of-the-art review. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 411-416.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 杨屹, 樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析. *生态学报*, 2019, 39(14): 5040-5050.
- [18] Xun F F, Hu Y C. Evaluation of ecological sustainability based on a revised three-dimensional ecological footprint model in Shandong Province, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 582-591.
- [19] Yang Y, Ling S, Zhang T, Yao C X. Three-dimensional ecological footprint assessment for ecologically sensitive areas: a case study of the Southern Qin Ling Piedmont in Shaanxi, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194: 540-553.
- [20] 甄霖, 魏云洁, 谢高地, Helming K, 曹淑艳, 杨莉, 潘影, Koenig H. 中国土地利用多功能性动态的区域分析. *生态学报*, 2010, 30(24): 6749-6761.
- [21] 张恒义, 刘卫东, 王世忠, 单娜娜, 梁红梅. “省公顷”生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算——以浙江省为例. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 82-92.
- [22] Luo W, Bai H T, Jing Q N, Liu T, Xu H. Urbanization-induced ecological degradation in midwestern China: an analysis based on an improved ecological footprint model. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 137: 113-125.
- [23] 熊德国, 鲜学福, 姜永东. 生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 618-626.
- [24] Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Suen H P, Guo J, Xu N, Li W J, Zhao Y Y, Yang J, Yu C Q, Wang X, Fu H H, Yu L, Dronova I, Hui F M, Cheng X, Shi X L, Xiao F J, Liu Q F, Song L C. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.

- [25] Ress W E, Wackernagel M. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: measuring the natural capital requirements of the human economy. *Focus*, 1996, 6(1): 45-60.
- [26] Spellerberg I F, Fedor P J. A tribute to claude shannon (1916-2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'shannon-wiener' index. *Global Ecology and Biogeography*, 2003, 12(3): 177-179.
- [27] 张可云, 傅帅雄, 张文彬. 基于改进生态足迹模型的中国 31 个省级区域生态承载力实证研究. *地理科学*, 2011, 31(9): 1084-1089.
- [28] 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.
- [29] Nakajima E S, Ortega E. Carrying capacity using energy and a new calculation of the ecological footprint. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1200-1207.
- [30] Kanemoto K, Moran D, Hertwich E G. Mapping the carbon footprint of nations. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(19): 10512-10517.
- [31] Hu J X, Wood R, Tukker A, Boonman H, De Boer B. Global transport emissions in the swedish carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 210-220.
- [32] Li H, Zhang P D, He C Y, Wang G. Evaluating the effects of embodied energy in international trade on ecological footprint in China. *Ecological Economics*, 2007, 62(1): 136-148.
- [33] Chen C Z, Lin Z S. Multiple timescale analysis and factor analysis of energy ecological footprint growth in China 1953-2006. *Energy Policy*, 2008, 36(5): 1666-1678.
- [34] Hubacek K, Guan D, Barrett J, Wiedmann T. Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: ecological and Water Footprints. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(14): 1241-1248.
- [35] Ahmed Z, Wang Z H. Investigating the impact of human capital on the ecological footprint in India: an empirical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(26): 26782-26796.