

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

杜悦悦¹, 彭建^{1,2*}, 高阳³, 赵会娟²

(1. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518005;

3. 中国农业大学资源与环境学院, 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘要:生态足迹是区域可持续评估的重要方法, 三维生态足迹模型能区分并追踪自然资本存量的消耗与流量的占用。目前三维足迹与自然资本利用研究主要集中在全球和国家尺度。本文以京津冀城市群为例开展区域尺度研究, 核算并分析了2010年研究区13个城市的人均区域足迹深度、足迹广度及其组成差异与影响因素, 揭示了京津冀城市群自然资本利用格局及生态可持续现状。结果表明: 13个城市普遍生态赤字, 足迹深度差异受能源消费数量和结构的突出影响, 与城市经济发展水平呈“倒N型”库兹涅茨曲线关系。京津冀城市群内4种自然资本利用类型分别为存量资本消耗水平相对于流量资本占用水平严重超前(北京、天津、唐山)、显著超前(石家庄、邯郸)、一般超前(沧州、廊坊、衡水、邢台、保定)及基本一致(秦皇岛、张家口、承德)。上述4种类型地域的区域生态持续性依次从最弱转向较弱、较强、最强。本文在城市群自然资本持续利用的刻画和表达方面取得了较优于传统二维足迹模型的评价结果。

关键词: 三维生态足迹; 足迹深度; 足迹广度; 自然资本; 生态持续性; 京津冀城市群

1 引言

自然资本作为提供产品流或服务流的自然收益和自然资源贮藏, 是社会可持续发展不可替代的必要保障(Costanza et al, 1992; Farley et al, 2006; 邬建国等, 2014)。自然资本由流量资本和存量资本组成, 二者分别用于维持和补充年际可再生资源流和生态系统服务的供给(Daly, 1994)。国内外学者提出若干富有价值的指标和方法以实现自然资本的度量 and 可持续性分析, 如 Wackernagel 等(1996)提出的生态足迹即为一例。生态足迹模型将生态生产性土地作为产生有形资产和无形服务的自然资本, 用生态足迹表征一定人口规模通过资源消费、废弃物排放产生的生态环境占用和自然资本需求,

用生态承载力表征自然资本供给能力, 进而比较区域自然资本供需状况, 以判断人类对自然资本的利用是否可持续(Wackernagel et al, 2004)。生态足迹方法因其概念形象、易于操作、框架简明的特点被广泛认同(徐中民等, 2001; 方恺, 2013), 但该模型也存在一定局限, 其中之一即是无法区分流量资本和存量资本的相互关系, 也难以体现生态透支在时间维度上的积累和不可持续状况(周涛等, 2015)。基于此, Niccolucci 等(2009)提出三维生态足迹模型, 引入生态足迹深度和生态足迹广度指标来区分和追踪自然资本存量的消耗与自然资本流量的占用, 提供了将“资本存量是否减少及减少的程度”作为可持续性强弱判定的定量化途径, 对可持续发展的核心议题尤其是生态经济学界公认的可持续发展

收稿日期: 2016-07; 修订日期: 2016-09。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAJ15B02) [Foundation: National Science and Technology Support Program of China, No.2012BAJ15B02]。

作者简介: 杜悦悦(1991-), 女, 湖北襄阳人, 博士生, 研究方向为综合自然地理学与景观生态, Email: duyueyue91@pku.edu.cn。

通讯作者: 彭建(1976-), 男, 四川彭州人, 博士, 副教授, 研究方向为景观生态与土地利用, E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn。

引用格式: 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.].
DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.10.002

基本准则作出了很好的回应。三维生态足迹模型兼具空间属性和时间属性,在表征不同区域同一时期或同一区域不同时期的资源消费及生态系统服务使用的公平性差异方面也具有独到优势(方恺, Reinout, 2012; 方恺, 2013),被认为显著丰富了生态足迹理论的经济内涵(Niccolucci et al, 2011)。

三维足迹模型作为相关领域的国际最新进展,强调了自然资本存量恒定对维持可持续的生态系统结构、功能与过程所起的关键作用,提供了基于自然资本利用的可持续评价新视角。近年来,国内外学者开始逐步将生态足迹评估的重点从二维转向三维模型。例如, Niccolucci 等分析了 1961-2006 年全球尺度生态足迹广度、深度的变化趋势,并讨论了三维足迹模型应用于国家尺度足迹核算的有效性,提供了追踪生态承载力来源及流量、存量压力的理论基础(Niccolucci et al, 2009; Niccolucci et al, 2011)。方恺(2013)针对三维足迹计算中不同类型生态赤字可能因累加而抵消并影响足迹深度真实性的缺陷,提出改进的三维足迹模型并应用于中国分省(方恺, 李焕承, 2012)、全国(方恺, 2013)及全球尺度(方恺等, 2013; 方恺, 2014a, 2015)的自然资本利用时空变化特征分析;继而对表征土地足迹的三维生态足迹进行拓展研究,探索了整合足迹家族和行星边界的全球环境可持续性综合评估新框架(Fang et al, 2014, 2015; 方恺, 2014b; 方恺等, 2015)。Peng 等(2015)基于三维生态足迹构建了“生态—公平—效率”的自然资本可持续利用多维评估框架,将资本利用的公平、效率测度与生态持续性分析结合,定量解析了足迹广度基尼系数、足迹深度变异系数、人类发展指数。此外,也有学者基于三维生态足迹核算结果分析资源型城市自然系统资源贮存,从而测度了城市发展转型现状与趋势(朱琳等, 2013; 王冠, 2016);基于最小二乘回归、投影重要性分析等方法,定量诊断了区域自然资本利用变化的主导影响因素(胡美娟等, 2015; 张星星等, 2016)。

总体来看,在三维生态足迹短暂的发展历程中,全球、国家尺度的研究相对较为丰富,城市群尺度的分析较为少见(张星星等, 2016)。近 10 年来,作为中国城镇化发展的战略依托,城市群提供了社会经济骨架形态和新型城镇化的空间主体(方创琳, 2014);关注城市群自然资本可持续利用的整体水平和内部分异,可为城市化进程自然资本供

需矛盾解析提供新的视角。京津冀城市群作为中国的政治、文化中心和北方经济的重要核心区,面临自然生态脆弱、环境污染、资源消耗的严峻问题,区域社会经济发展水平和自然资本供需对比差异悬殊。因此,本文基于三维生态足迹模型分析 2010 年京津冀城市群自然资本可持续利用状态,并对比分析自然资本耗竭差异成因,以期京津冀社会经济和生态环境协同发展提供决策参考。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区概况

京津冀城市群是中国三大城市群之一,地处 $36.07^{\circ}\text{N}\sim 42.65^{\circ}\text{N}$ 、 $113.46^{\circ}\text{E}\sim 119.79^{\circ}\text{E}$ 的华北平原,总面积约 21.66万 km^2 。区域内地势由西北向东南倾斜,坝上高原、燕山、太行山、山麓平原、滨海平原等地貌类型多样,山区与平原分别约占京津冀总面积的 48.2% 和 43.8%。土地覆被/土地利用类型空间分异明显,海岸滩涂、滨海湿地、农田、城市、灌丛、森林、草原从东南到西北依次更替(刘金龙等, 2013),整体呈东南部种植业用地向西北部林牧业用地过渡的格局。该区域属暖温带大陆性湿润与半湿润性气候,降水量自东南向西北递减,年均 $300\sim 700\text{ mm}$ 。

京津冀城市群涉及 2 市 1 省,包括北京和天津 2 个直辖市,以及河北省的石家庄、唐山、保定、秦皇岛、廊坊、沧州、承德、张家口、邯郸、衡水、邢台等 11 个地级市。京津冀城市群为中国人口密集区,2013 年总人口 10919.41 万,占全国比重的 8%,且预计 2020 年人口总数将达到 1.2 亿。2000-2012 年,京津冀地区城镇人口比例平均增速为 3.51%,2013 年城镇化率达 60.14%,超过全国同期平均值 6.41%。快速城镇化背景下的京津冀地区生态环境相对脆弱,水资源短缺、空气污染较重,自然资本耗竭严重,制约着区域经济社会的进一步发展。

2.2 数据来源

本文主要核算消费性生态足迹,即依据区域年际资源消费量计算生态生产性土地面积的占用。其中,资源、能源消费数据来源于统计资料,包括《中国城市统计年鉴 2011》《中国能源统计年鉴 2011》《中国 2010 年人口普查资料》《河北经济年鉴 2011》及京津冀城市群所涵盖的北京、天津、石家庄等 13 个城市的 2010 年统计年鉴。主要农业初级产

品全球平均产量和各类消费项目对应的生态生产性土地类型主要参考谢鸿宇等(2008)的研究成果。生态承载力则依据第二次全国土地调查京津冀地区相关数据计算得到,土地分类参见国土资源部2007年颁布的全国土地分类标准。此外,本文采用的均衡因子来自全球生态足迹网络(Global Footprint Network, <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/>)2010年国家账户生态足迹核算方法指南,产量因子引自刘某承等(2010)的研究成果。需要说明的是,为增强与京津冀城市群相关研究的可比性,并考虑到该地区自然资本利用格局短期内相对稳定,本文最终采用2010年数据资料进行相关分析。

2.3 三维生态足迹核算

首先根据传统二维生态足迹的理论和方法(徐中民等, 2001),并考虑数据可获得性,将2010年京津冀城市群生态足迹账户分解为生物资源消费、建设用地(非水电)消费、能源消费3个部分;进而基于二维模型下的生态足迹指标计算得到三维模型下京津冀城市群13个城市的生态足迹深度与广度。

根据Niccolucci等(2009)的三维足迹理论,足迹广度表征人类占用自然资本流量的水平,表明了区域生态承载力限度内实际占用的生态生产性土地面积,具有空间属性。足迹深度表征人类消耗自然资本存量的程度,表明了人类对超出生物承载力部分资源的累积需求,具有时间属性;可表征为维持区域现有资源消费水平理论上所需占用的区域土地面积的倍数,或者相同政策及技术条件下再生出区域1年资源消耗量所需的时间(方恺, Reinout, 2012)。计算公式如下(Niccolucci et al, 2009):

$$EF_{depth} = \frac{EF}{BC} = \frac{BC + ED}{BC} = 1 + \frac{ED}{BC} \quad (1)$$

$$EF_{size} = \frac{EF}{EF_{depth}} \quad (2)$$

式中: EF_{depth} 表示足迹深度; EF_{size} 表示足迹广度; EF 、 BC 、 ED 分别表示生态足迹、生态承载力和生态赤字;1表示足迹深度的自然原长, $EF_{depth} \geq 1$ 。当 $EF \leq BC$ 时, $EF_{depth} = 1$ 。此外,流量自然资本占用水平主要由自然资源禀赋决定,故 EF_{size} 的取值范围为 $0 < EF_{size} \leq BC$ 。

基于方恺等(2013)的改进算法,可由地类水平的三维足迹指标得到区域水平的三维生态足迹:

$$EF_{size,region} = \sum_{i=1}^n EF_{size,i} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \quad (3)$$

$$ED_{region} = \sum_{i=1}^n ED_i = \sum_{i=1}^n \max\{EF_i - BC_i, 0\} \quad (4)$$

$$EF_{depth,region} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n ED_i}{BC} \quad (5)$$

式中: i 表示生态生产性土地的地类; $EF_{size,region}$ 和 $EF_{size,i}$ 分别为区域和地类足迹广度; $EF_{depth,region}$ 为区域足迹深度; ED_{region} 为区域生态赤字; EF_i 、 BC_i 、 ED_i 分别为地类 i 的生态足迹、生态承载力和生态赤字; BC 为扣除12%的生物多样性保护土地面积后该区域的生态承载力。由各地类的生态赤字求得区域生态赤字的过程,避免了某些地类生态赤字可能被其他地类生态盈余所补偿,从而使区域足迹广度偏大、足迹深度偏小的问题,可以更真实地反映资本消耗的严峻现状(方恺等, 2013; 方恺, 2015)。

3 结果与分析

3.1 三维生态足迹广度及其构成

足迹广度刻画自然资本的流动性强弱和人类活动占用流量资本的程度。人均区域足迹广度高值多集中在资源富足且人口密度较小地区,而足迹广度低值则更易出现在人口稠密、资源相对匮乏的区域。13个城市的人均区域足迹广度依次为:张家口 > 承德 > 秦皇岛 > 保定 > 衡水 > 邢台 > 唐山 > 沧州 > 廊坊 > 石家庄 > 邯郸 > 天津 > 北京,河北省平均值介于秦皇岛与保定之间(图1)。

人均区域足迹广度理论上由可更新资源生态足迹广度和不可更新资源(能源)生态足迹广度2个部分组成。化石能源是最主要的资本利用方式,但根据生态足迹理论,人类并未专门留出用于吸纳化

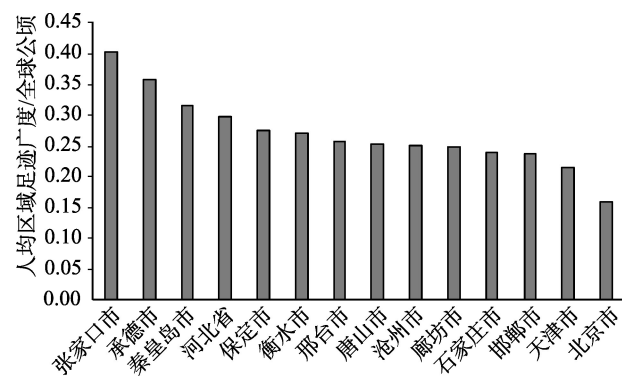


图1 京津冀城市群人均区域足迹广度

Fig.1 Per capita regional ecological footprint size of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

石能源燃烧排放CO₂的生态生产性土地(Wackernagel et al, 1996),故13个城市的化石能源用地足迹广度均为0。其余的5种生态生产性土地中,耕地组分对京津冀城市群足迹广度贡献较大,各城市耕地足迹广度相对于该城市人均区域足迹广度的占比高达49.79%~76.35%(最小和最大值分别对应北京和邯郸);其次是建设用地(组分占比为16.96%~27.48%,最小值和最大值分别对应邯郸和衡水)及林地(组分占为1.16%~26.00%,最小值和最大值分别对应衡水和张家口);水域和草地对各城市的足迹广度贡献较小(图2)。上述5类资源的利用情况在各城市间也不尽相同。

进一步以京津冀城市群耕地、建设用地、林地的人均足迹广度占比为例重点分析。耕地人均足迹广度的组分占比较大,除北京外各市耕地均有生态盈余,表明农业生产仍然是该城市群非常重要的自然资本利用方式,并与该地区特别是河北中部和南部平原坚守粮食生产耕地红线等密不可分。除耕地外,建设用地是京津冀城市群大多数城市流量占用水平次高的生态生产性土地类型,这与快速发展中各市建设用地需求持续增加、建设用地面积扩张有关。足迹广度核算结果表明,建设用地组分在人均区域足迹广度中的占比与城市人口密度呈正相关关系,意味着人口聚集、城市化较快的区域,其耕地、林地、草地、水域等组分的足迹广度占比会随以上生态生产性地类向建设用地转化而有所降低。林地的占用主要反映木材对国民生产生活的必要性,除张家口、秦皇岛、承德外,其余城市林地消费足迹均为赤字,林地的足迹深度超过其自然深度,此时林地足迹广度 EF_{size} 不再与林地消费足迹

EF 关联,而是对应于林地生态承载力 BC (即 $EF \geq BC$ 时, $EF_{size}=BC$)。

3.2 三维生态足迹深度及其影响因素

足迹深度刻画自然资本存量消耗的程度。13个城市的人均区域足迹深度依次为:衡水<承德<张家口<保定<沧州<廊坊<邢台<秦皇岛<邯郸<石家庄<北京<天津<唐山,河北省平均值位于秦皇岛和邯郸之间(图3)。总体上,资源富足型城市足迹深度普遍较低,资源匮乏型城市则较高。京津冀城市群的城市均处于生态赤字状态,各城市足迹深度均大于原长1。

从足迹深度构成来看,除了化石能源用地之外的其他5种生态生产性土地中,草地是多数城市足迹深度的主要构成部分且城市间分异明显,主要与本地草地资源禀赋相关,而牛羊肉奶类等消费影响甚微;人均草地承载力和人均草地足迹在13个城市间的变异系数分别为247.5%和21.4%,表明前者对草地足迹深度区际差异的影响远超后者。除北京外的各城市水域、建设用地、耕地的足迹深度均为1,表明在城市整体赤字的情形下,某些土地分项存在盈余;快速城市化过程中产业规模化、集约化的空间布局以及其他类型土地向建设用地的转化缓解了建设用地的生态承载压力。在林地组分方面,除张家口、秦皇岛、承德外,其余城市林地消费足迹均为赤字,林地足迹深度因而超过原长1。从足迹深度影响因素来看,化石能源碳排放是存量自然资本利用的主要方式和生态超载的主要驱动力(方恺等, 2013)。能源的消耗多而又无专门的碳汇土地来承载其足迹,故能源足迹账户成为各市最大的赤字缺口项。例如,唐山市在发展重化工业尤其是钢

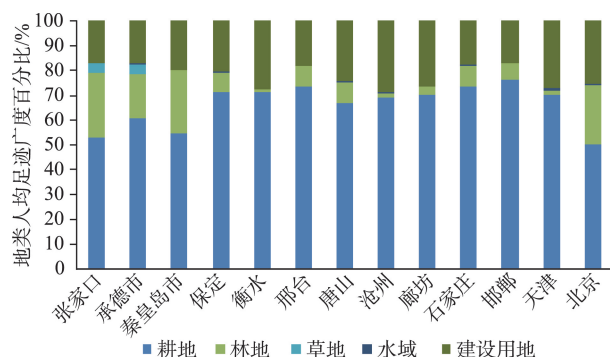


图2 京津冀城市群人均区域足迹广度构成

Fig.2 Composition of per capita regional ecological footprint size of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

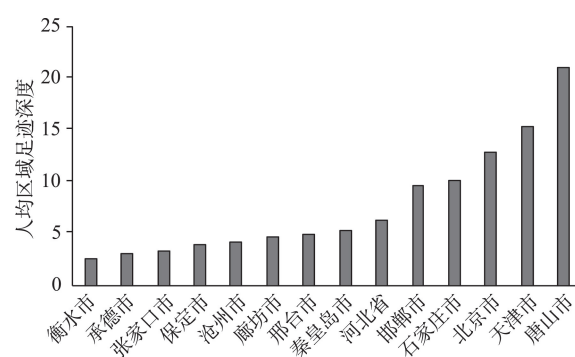


图3 京津冀城市群人均区域足迹深度

Fig.3 Per capita regional ecological footprint depth of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

铁工业大规模发展的背景下,2010年能源消费生态足迹总量高达6384.87万全球公顷,分别占河北省和京津冀城市群能源消费足迹的32.1%和22.9%;人均能源足迹高达8.42全球公顷,为河北省人均能源消费足迹的3倍,最终足迹深度高达20.98。此外,人均区域足迹深度与人均能源消费足迹呈正向线性关联,相关关系的决定系数 R^2 达到0.6556且通过置信度为95%的显著性检验(图4)。

区域足迹深度通过生态赤字与能源消费密切相关,能源消费赤字是京津冀各城市足迹深度超过原长的主要原因。不同城市迥异的足迹深度受能源消费数量和能源消费结构2个方面共同影响。以北京和天津为例,2010年北京市能源消费总量为6954万吨标准煤,高于天津的6818万吨标准煤;但

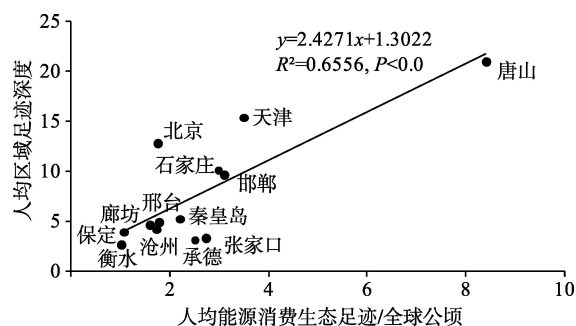


图4 京津冀城市群人均区域足迹深度与人均能源消费生态足迹的相关关系

Fig.4 Relationship between per capita regional ecological footprint depth and per capita ecological footprint of energy consumption in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

北京市能源足迹总量为3443.9万全球公顷,小于天津的4553.4万全球公顷;人均能源足迹为1.7560全球公顷,亦小于天津的3.5045全球公顷。比较能源消费结构可知,天津市以煤炭、原油、焦炭为主,其中煤炭消费总量足迹在能源消费总量足迹中的占比高达50.57%,这些传统能源虽然热量高但单位能源碳排放量较大,燃料过程也更易产生硫化物、温室气体和固体颗粒物污染;而北京市煤炭足迹仅占全市能源消费总足迹的36.65%,原油占24.05%,焦炭占4.17%,汽油、煤油、天然气、水电等使用量占比较高。因此,北京能源消费的绝对数量虽比天津稍高,但能源结构比天津更优,最终前者的能源足迹总量、人均能源消费足迹、人均区域足迹深度均小于后者(图5)。也就是说,较优的能源结构使得北京市在能源消费总量更大的情况下带来相对较小的能源消费足迹和区域足迹深度。由此可见,当社会经济发展尚较多依赖能源消费且短时间内难以规模降低总能耗水平时,可尝试通过逐步改善能源消费结构、多使用清洁能源的途径来削减能源消费足迹赤字、减小足迹深度、降低自然资本存量耗竭程度。

能源消费问题是影响区域足迹深度的首要因素,经济发展则对其形成重要外部驱动。对比分析地区足迹深度与经济规模,可以发现足迹深度总体上依赖富裕水平。例如,2010年唐山和石家庄的GDP总量和人均GDP居河北省前2位,在足迹深度方面,2个城市也均数倍于河北省平均值(6.26),表明发达地区有可能以透支后代特别是周边欠发达

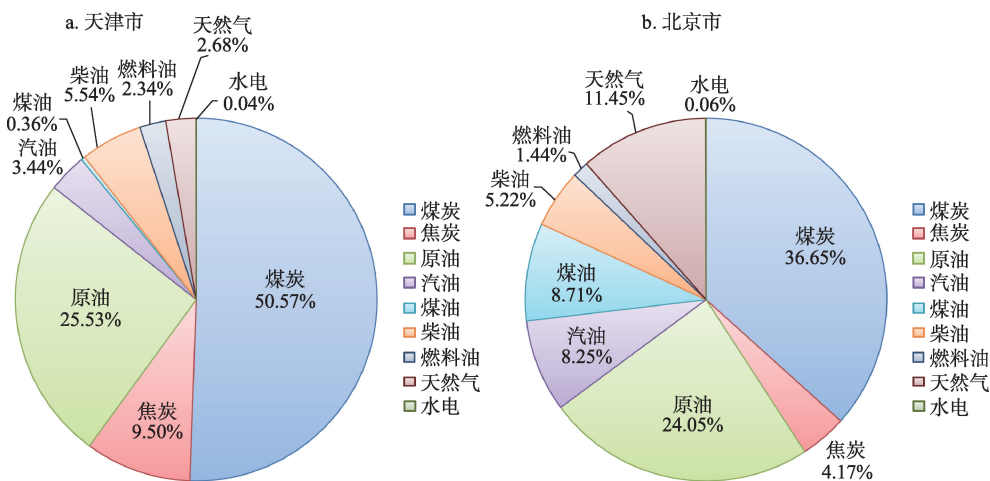


图5 2010年北京市和天津市能源消费足迹结构对比

Fig.5 Comparison of the structures of energy consumption ecological footprint of Beijing and Tianjin in 2010

地区后代的自然资本享用权为代价来增加自身财富(方恺等, 2013)。进一步研究发现, 足迹深度随GDP的增长, 存在类似于环境库茨涅兹曲线的拐点(图6): 人均GDP低于3.5万元时, 人均区域足迹深度与人均GDP呈现出一定的正相关趋势; 人均GDP达6万元及以上时, 人均区域足迹深度随GDP的增长反而下降, 这显然与产业结构的调整优化、高新技术及清洁能源的使用、能源利用效率的提高、低资源密集型活动的减少等密切相关。相关研究证明, 生态足迹与经济发展(增长)间可能存在“倒U”或“倒N”型曲线关系, 二者的演化规律基本符合库茨涅兹曲线特征(何蓓蓓等, 2009; 钱文婧等, 2010)。本文中, 拟合人均区域足迹深度与人均GDP关系的三次项方程各项系数分别为: $\beta_1 = -23.701 < 0$, $\beta_2 = 7.7586 > 0$, $\beta_3 = -0.6582 < 0$, 说明京津冀城市群足迹深度与该区域经济发展很可能也存在“倒N型”的曲线关系; 尽管受样本数及截面数据单时点等的限制, 曲线的客观性及其拐点的存在机理尚需进一步验证, 然而经济发展对足迹深度的影响是显而易见的, 二者的曲线关系可为探索京津冀城市群经济增长中资源环境压力的缓解途径提供有益思路。

4 讨论

4.1 自然资本可持续利用分区

比较京津冀城镇群各城市人均区域足迹广度和人均区域足迹深度的分布情况(图7^①), 可以发现由足迹深度表征的存量资本的消耗与足迹广度表

征的流量资本的占用存在地域互补性, 按足迹深度升序排列的13个城市其足迹广度大体呈现出下降趋势。其中, 衡水、承德、张家口等为存量消耗低值区和流量占用高值区, 廊坊、邢台、秦皇岛为存量消耗和流量占用中值区, 而北京、天津、唐山等则为存量消耗高值区和流量占用低值区。各城市足迹深度均大于自然深度1, 流量资本不足导致存量资本大幅消耗已成为京津冀城镇群乃至整个中国社会发展的常态。

将京津冀城市群人均区域足迹深度、人均区域足迹广度进行Z-Score标准化, 并用象限图进行展示(图8); 进而基于各市标准化人均区域足迹深度、人均区域足迹广度开展SOFM聚类, 并借助ArcGIS对聚类结果进行空间表达, 以反映京津冀城市群自然资本利用格局。如图9所示, 京津冀城市群自然资本可持续利用分区具有明显的地域集聚性, 与京津冀地区自然地形地貌、土地利用/土地覆被以及社会经济发展现状的空间格局基本吻合:

(1) I类城市(北京、天津、唐山): 各市人均区域足迹深度很大(12.8~21.0)、人均区域足迹广度很小(0.157~0.252全球公顷)。由足迹深度表征的存量资本消耗严重超前于由足迹广度表征的流量资本占用水平, 经济高度发展需要自然资本支撑, 同时由于资源禀赋很差, 因而资源消费的生态压力最大, 生态持续性在京津冀城市群中最弱。该类型3个城市平均足迹深度为16.3840, 平均足迹广度为0.2080全球公顷。

(2) II类城市(石家庄、邯郸): 各市人均区域足

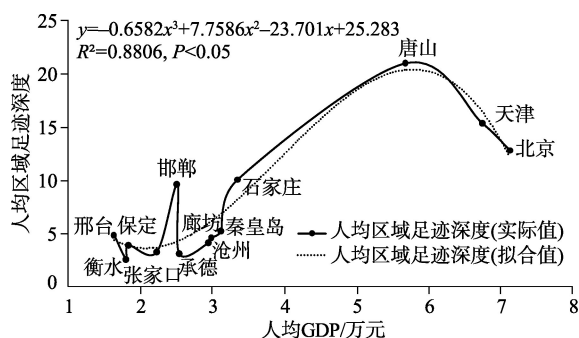


图6 京津冀城市群足迹深度与经济发展的关系

Fig.6 Relationship between per capita regional ecological footprint depth and per capita GDP of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

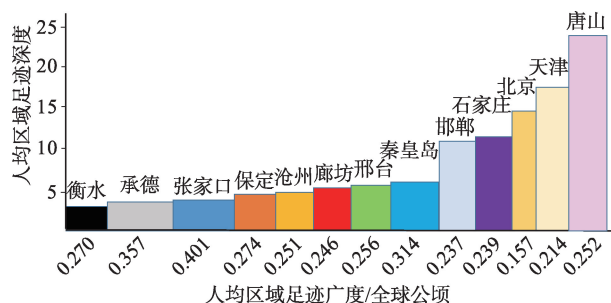


图7 京津冀城市群人均区域足迹深度和足迹广度综合比较

Fig.7 Comparison between per capita regional ecological footprint depth and ecological footprint size in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

①图7中矩形的颜色表示不同城市, 长和宽分别表示人均区域足迹深度和足迹广度。

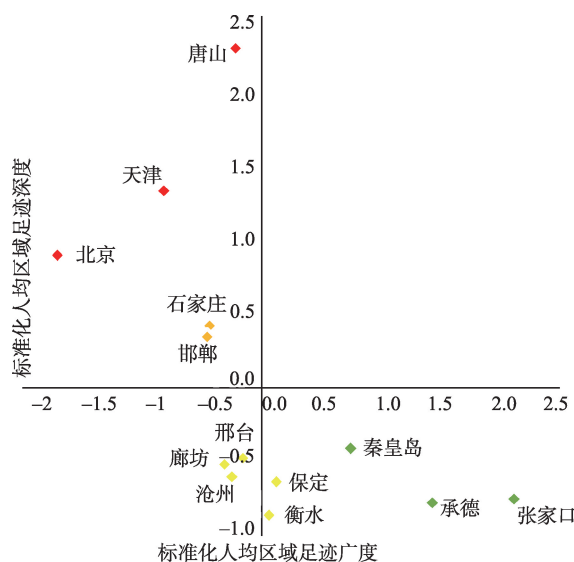


图8 京津冀城市群标准化人均区域生态足迹深度和足迹广度象限分布

Fig.8 Quadrantal diagram of standardized per capita regional ecological footprint depth and per capita regional ecological footprint size of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

迹深度较大(9.6~10.1)、人均区域足迹广度较小(0.237~0.239全球公顷),存量资本消耗显著超前于流量资本占用;生态持续性在京津冀城市群中较弱。该类型2个城市平均足迹深度为9.8508,平均足迹广度为0.2378全球公顷。

(3) III类城市(沧州、廊坊、衡水、邢台、保定):各市人均区域足迹深度较小(2.6~4.9)、人均区域足迹广度较大(0.246~0.274全球公顷)、存量资本消耗一般超前于流量资本占用,生态持续性在京津冀城市群中较强。该类型5个城市平均足迹深度为4.0232,平均足迹广度为0.2595全球公顷。

(4) IV类城市(秦皇岛、张家口、承德):各市人均区域足迹深度较小(5.2~3.1)、人均区域足迹广度很大(0.314~0.401全球公顷);存量资本消耗与流量资本占用的平均水平基本一致。在生态赤字普遍存在的情形下,城市生态容量亏空不严重,生态持续性在该城市群中相对最强。该类型3个城市平均足迹深度为3.8611,平均足迹广度为0.3574全球公顷。

对比京津冀可持续发展分区已有的相关研究结果,可发现与本文对该地区的整体空间差异认知基本一致。例如,张达等(2015)以县为基本单元的京津冀可持续发展主要资源和环境限制性要素研

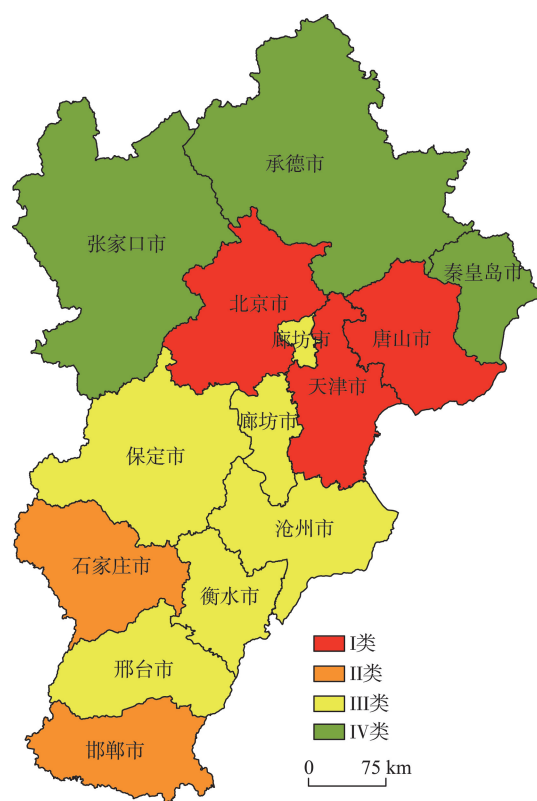


图9 京津冀城市群自然资本可持续利用分区

Fig.9 Classification of natural capital sustainability in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

究表明,张家口、承德以及北京西北部是生物多样性优先保护区,衡水、邢台和邯郸等为耕地优先保护区,与本文各市足迹广度和足迹深度的高低及构成分析结果基本一致。同时,由于可持续发展定义的广泛性与研究主题的多样性,相关分区又不完全吻合,主要受限于不同分区目的、内容、要素、方法的差异。例如,以生态环境承载力作为京津冀可持续发展的量度,基于指标加权集成比较压力和支撑力,分区结果表明北京、承德、秦皇岛、衡水、沧州、廊坊属于生态健康,张家口为生态适宜,天津、唐山、石家庄、邯郸、保定、邢台为生态超载(文魁等,2013)。本文结果与其略有差异,同各自的研究侧重及相应统计指标的类型和汇总方式有关。前者关注子系统行为与地区可持续发展总体运行态势的关联,围绕资源、环境及社会系统承载力3个方面,基于丰富的指标得到综合承载力的无量纲数值;本文基于三维生态足迹的分区方法,从自然资本利用视角出发,采用均衡因子等参数将不同形式的资源能源消耗整合为统一的土地占用面积量纲,且强调不可再生能源的消费对于存量资本耗竭及

可持续性的影响。

4.2 三维足迹与传统模型比较

为比较生态足迹三维模型和传统二维模型在刻画城市群自然资本利用及生态持续性状况方面的有效性差异,本文基于京津冀城市群标准化人均生态足迹、人均生态承载力指标开展SOFM聚类,聚类参数设置保持一致。结果表明:传统生态足迹视角下,唐山单独成为一类自然资本利用区,北京、天津、石家庄、邯郸聚为一类,秦皇岛、保定、邢台、沧州、廊坊聚为一类,张家口、承德、衡水为一类。三维足迹指标评价结果与传统二维足迹模型存在较大出入,相对而言,前者相对更优,大致有以下方面的理由。

从标准化数值象限图直观分析,三维足迹指标下自然资本利用类型相同的样本点分布集中且大多位于同一象限内,不同类型的点群分布范围差异明显(图8);二维足迹指标下的分布特征则不如前者有规律,除唐山自成一类之外,每类点群都跨越2个象限,且同类点群内各样本点分布相对离散(如衡水与承德、张家口),不同类的样点间分布相对密集(如北京与邢台、秦皇岛)(图10)。从模型理论和指

标内涵分析,三维足迹模型将生态赤字分解成表征时间维的足迹深度和表征空间维的足迹广度,体现了前者对生态持续性的显著影响,与传统二维模型相比,能以其丰富的信息解析生态持续性的结构及性质差异。例如,二维足迹指标下,北京与邢台、秦皇岛人均赤字相似,分别以1.99、1.81、2.22全球公顷居于第5~7位;而三维足迹指标下,北京、邢台、秦皇岛人均区域足迹广度的排序依次为13、6、3,人均区域足迹深度排序11、7、8,揭示了北京以较小足迹广度和较大足迹深度明显呈现出存量消耗为主的自然资本利用方式,而秦皇岛和邢台的存量资本消耗与流量资本占用水平差距相对不悬殊。从客观实际分析,基于三维足迹指标的自然资本利用格局比二维评价结果更能指示地区经济发展水平、资本分配流向与资源集聚的特征差异。因此,资源消费和供给的矛盾在生态足迹三维模型上能得到更直观的反映,一定程度上弥补了传统二维模型对人类环境影响评估的不足。

5 结论

本文基于改进的生态足迹三维模型核算分析了2010年京津冀城市群13个城市人均区域足迹深度、人均区域足迹广度及其构成差异与影响因素,并进一步探讨了京津冀城市群自然资本可持续利用分区。研究表明,京津冀城市群13个城市足迹深度均超过原长,流量资本不足导致存量资本大幅消耗已成为京津冀城市群社会发展的常态。存量资本的消耗与流量资本的占用存在一定地域互补性。13个城市的4类自然资本利用类型表现出明显的地域集聚格局。其中,北京、天津、唐山属于存量消耗高值区和流量占用低值区,存量资本消耗严重超前于以足迹广度表征的流量资本占用水平;区域发展的生态压力较大,生态持续性在京津冀城市群中相对最弱。本文基于三维生态足迹理论区分自然资本存量消耗与流量占用,并强调前者对于生态持续性的影响,从而在城市群自然资本利用表达方面取得了较优于传统二维足迹模型的评价结果。

在生态赤字普遍存在的背景下,提高自然资本流动性并减少存量资本消耗是生态经济学视角下促进可持续发展的可行途径之一(方恺等, 2013; Fang et al, 2015)。因而,需尽可能增加足迹广度并减少足迹深度。前者由本地自然资源禀赋决定不

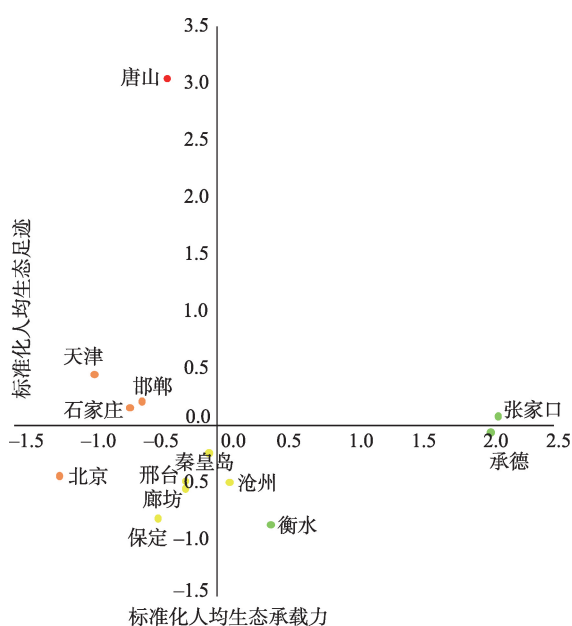


图10 京津冀城市群标准化人均生态足迹和生态承载力象限分布

Fig.10 Quadrantal diagram of standardized per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

易改变,而后者与能源消费足迹赤字密切相关,可尽量减少化石能源使用总量并优化能源消费结构以减小足迹深度、降低自然资本存量耗竭程度。

此外,本文基于2010年截面数据初步探索了京津冀城市群足迹深度及自然资本利用现状与经济增长之间可能存在的“倒N”型曲线关系。下一步可基于包含时间序列和截面2个维度的面板数据开展生态足迹与经济关联研究,以增强库兹涅茨曲线表达城市群内各城市足迹深度与GDP关系的可靠性,以及不同城市演变特征的对比性;并尝试将库兹涅茨曲线的相关理论和作用机制用于该区域的自然资本分区管理和可持续发展统筹,以期缓解资源环境保护与社会经济发展的矛盾。

参考文献(References)

- 方创琳. 2014. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 69(8): 1130-1144. [Fang C L. 2014. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China[J]. Acta Geographica Sinica, 69(8): 1130-1144.]
- 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. 2014a. 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. 2014a. 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. 2014b. 基于足迹家族和行星边界的主要国家环境可持续性多维评价[J]. 生态环境学报, 23(11): 1868-1875. [Fang K. 2014b. Multidimensional assessment of national environmental sustainability based on footprint family and planetary boundaries[J]. Ecology and Environmental Sciences, 23(11): 1868-1875.]
- 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, 段峥. 2015. 全球主要国家环境可持续性综合评估: 基于碳、水、土地的足迹—边界整合分析[J]. 自然资源学报, 30(4): 539-548. [Fang K, Duan Z. 2015. An integrated assessment of national environmental sustainability by synthesizing carbon, water and land footprints and boundaries[J]. Journal of Natural Resources, 30(4): 539-548.]
- 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 ecological footprint depth and size[J]. Journal of Natural Resources, 27(12): 1995-2005.]
- 方恺, Reinout H. 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.]
- 何蓓蓓, 梅艳. 2009. 江苏省生态足迹与经济增长关系的实证研究[J]. 资源科学, 31(11): 1973-1981. [He B B, Mei Y. 2009. An empirical study on the relationship between economic growth and ecological footprint in Jiangsu Province, China[J]. Resources Science, 31(11): 1973-1981.]
- 胡美娟, 周年兴, 李在军, 等. 2015. 南京市三维生态足迹测算及驱动因子[J]. 地理与地理信息科学, 31(1): 91-95. [Hu M J, Zhou N X, Li Z J, et al. 2015. Calculation and driving factor analysis of three-dimensional ecological footprint in Nanjing City[J]. Geography and Geo-information Science, 31(1): 91-95.]
- 刘金龙, 马程, 王阳, 等. 2013. 基于径向基函数网络的京津冀地区生态系统服务脆弱性评估[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 49(6): 1040-1046. [Liu J L, Ma C, Wang Y, et al. 2013. Assessing the vulnerability of ecosystem services of Beijing-Tianjin-Hebei area based on radial basis function network[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 49(6): 1040-1046.]
- 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]. 生态学杂志, 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.]
- 钱文婧, 贺灿飞. 2010. 经济增长与环境关系: 生态足迹视角[J]. 生态经济, (10): 24-29. [Qian W J, He C F. 2010. The relationship of economic growth and environment: From

- the perspective of ecological footprint[J]. *Ecological Economy*, (10): 24-29.]
- 王冠. 2016. 资源型城市转型生态可持续性分析: 以河南省焦作市为例[J]. *生态经济*, 32(4): 53-56. [Wang G. 2016. Analysis on ecological sustainability in resource-based cities in transformation period: A case of Jiaozuo City[J]. *Ecological Economy*, 32(4): 53-56.]
- 文魁, 祝尔娟. 2013. 京津冀蓝皮书: 京津冀发展报告(2013): 承载力测度与对策[M]. 北京: 社会科学文献出版社. [Wen K, Zhu E J. 2013. Blue book of Beijing-Tianjin-Hebei: Annual report on Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region development (2013)[M]. Beijing, China: Social Sciences Academic Press.]
- 邬建国, 郭晓川, 杨劼, 等. 2014. 什么是可持续性科学[J]. *应用生态学报*, 25(1): 1-11. [Wu J G, Guo X C, Yang J, et al. 2014. What is sustainability science[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(1): 1-11.]
- 谢鸿宇, 王羚邨, 陈贤生, 等. 2008. 生态足迹评价模型的改进与应用[M]. 北京: 化学工业出版社. [Xie H Y, Wang L L, Chen X S, et al. 2008. Shengtaizuji pingjia moxing de gaijin yu yingyong[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press.]
- 徐中民, 程国栋, 张志强. 2001. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法: 以张掖地区1995年的生态足迹计算为例[J]. *生态学报*, 21(9): 1484-1493. [Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. 2001. Measuring sustainable development with the ecological footprint method: Take Zhangye prefecture as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(9): 1484-1493.]
- 张达, 何春阳, 邬建国, 等. 2015. 京津冀地区可持续发展的主要资源和环境限制性要素评价: 基于景观可持续科学概念框架[J]. *地球科学进展*, 30(10): 1151-1161. [Zhang D, He C Y, Wu J G, et al. 2015. Assessment of constraint factors of resources and environment of sustainable development in the Beijing-Tianjin-Hebei region: Based on the framework of landscape sustainability science[J]. *Advances in Earth Science*, 30(10): 1151-1161.]
- 张星星, 曾辉. 2016. 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/OL]. *环境科学学报*, doi: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0209. [Zhang X X, Zeng H. 2016. Dynamic of three dimensional ecological footprint in the Pearl River Delta and its driving factors[J/OL]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, doi: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0209.]
- 周涛, 王云鹏, 龚健周, 等. 2015. 生态足迹的模型修正与方法改进[J]. *生态学报*, 35(14): 4592-4603. [Zhou T, Wang Y P, Gong J Z, et al. 2015. Ecological footprint model modification and method improvement[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(14): 4592-4603.]
- 朱琳, 卞正富, 赵华, 等. 2013. 资源枯竭城市转型生态足迹分析: 以徐州市贾汪区为例[J]. *中国土地科学*, 27(5): 78-84. [Zhu L, Bian Z F, Zhao H, et al. 2013. Ecological footprint analysis in resource-exhausted cities in transformation period: A case study of Jiawang District in Xuzhou City[J]. *China Land Sciences*, 27(5): 78-84.]
- Costanza R, Daly H E. 1992. Natural capital and sustainable development[J]. *Conservation Biology*, 6(1): 37-46.
- Daly H E. 1994. Operationalizing sustainable development by investing in natural capital[M]//Jansson A M, Hammer M, Folke C, et al. Investing in natural capital: The ecological economics approach to sustainability. Washington DC: Island Press: 22-37.
- Fang K, Heijungs R, de Snoo G R. 2014. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family[J]. *Ecological Indicators*, 36: 508-518.
- Fang K, Heijungs R, de Snoo G R. 2015. Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint-boundary environmental sustainability assessment framework[J]. *Ecological Economics*, 114: 218-226.
- Farley J, Daly H. 2006. Natural capital: The limiting factor: A reply to Aronson, Blignaut, Milton and Clewell[J]. *Ecological Engineering*, 28(1): 6-10.
- 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.
- Peng J, Du Y Y, Ma J, et al. 2015. Sustainability evaluation of natural capital utilization based on 3DEF model: A case study in Beijing City, China[J]. *Ecological Indicators*, 58: 254-266.
- Wackernagel M, Rees W E, Testemale P. 1996. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[J]. *Population & Environment*, 1(3): 171-174.
- Wackernagel M, White S, Moran D. 2004. Using ecological footprint accounts: From analysis to applications[J]. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 3(3): 293-315.

Sustainability evaluation of natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region

DU Yueyue¹, PENG Jian^{1,2*}, GAO Yang³, ZHAO Huijuan²

(1. Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. College of Resources Environmental Sciences, Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Land and Resources, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Ecological footprint analysis is an important method of sustainability assessment. Three-dimensional ecological footprint model (3DEF) can distinguish and track the occupation of natural capital stock and the consumption of natural capital flows, and consequently elucidating the core issues of sustainable development. To date, studies that apply the 3DEF method for the evaluation of sustainable utilization of natural capital are relatively few and mainly concerned with the global or the national scale. Taking the Beijing-Tianjin-Hebei region as the study area, this research evaluated natural capital utilization sustainability based on a 3DEF model at the scale of metropolitan region. Using statistical data in 2010, this research first calculated the ecological footprint depth (EFdepth) and footprint size (EFsize) of 13 cities. It then, analyzed the difference in the composition of the 13 cities' EFdepth and EFsize, as well as its influencing factors and examined the pattern of the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region's natural capital use in 2010. Lastly, it examined the ecological sustainability status of this metropolitan region. The main conclusions of the study are as follows: Ecological deficit is prevalent in the 13 cities of the metropolitan region. EFdepth is deeply influenced by the amount and structure of fossil energy consumption. The relationship between EFdepth and economic development may be described by the environmental Kuznets curve (EKC) with an inverted N shape. According to the relationship between the depletion of stocks and the appropriation of flows, the 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region are divided into four categories, namely, the depletion of stocks is seriously, significantly, or generally ahead of the appropriation of flows, and the average level of the depletion of stocks and the appropriation of flows are the same. The ecological sustainability status of these four types of cities is, respectively, the weakest, weaker, stronger, and the strongest. The results presenting the natural capital utilization at the metropolitan region scale based on the 3DEF model are better than that with traditional ecological footprint model method.

Key words: three-dimensional ecological footprint; ecological footprint depth; ecological footprint size; natural capital; ecological sustainability; Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan region