

引用格式:洪顺发,郭青海,李达维.基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态[J].资源科学,2020,42(5):980-990.
[Hong S F, Guo Q H, Li D W. Spatiotemporal dynamics of ecological supply and demand based on ecological footprint theory[J].
Resources Science, 2020, 42(5): 980-990.] DOI: 10.18402/resci.2020.05.15

基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态

洪顺发¹,郭青海²,李达维³

(1. 中国海洋大学 国际事务与公共管理学院,青岛 266100;2. 浙江理工大学建筑
工程学院,杭州 310018;3. 中山大学地理科学与规划学院,广州 510275)

摘要:生态供需平衡是生态文明研究的一个科学问题,也是生态文明建设的实践基础。生态足迹因其所具有的社会-生态属性和宏观可度量性,成为生态供给与生态需求平衡关系研究的一个切入点。本文在生态足迹理论的基础上,构建生态足迹账户,优化生态足迹、生态承载力计算,评价了1995—2015年中国生态供需平衡状况。研究发现:①中国生态足迹2000年以后增长快速,最终形成东部>中部>西部的“阶梯化”的空间格局;生态承载力呈“局部调整,总体稳定”动态特征;②中国生态供需平衡状况于2005年前后发生质的变化,即由生态盈余转入“生态超载”状态。2015年,中国对自然环境的“占用”需要1.39个中国才能满足现有的生态需求;③东部地区生态超载状况远大于其他地区,西部地区生态承载力基础较差,生态足迹的增长引起了西部地区生态超载加速。其中,宁夏、新疆生态超载严重,且生态足迹呈中高速增长,应引起重视;④能源足迹与污染足迹的控制是改善地区生态供需平衡状况的关键内容。研究结果可为中国区域生态文明建设与生态规划提供参考。

关键词:生态足迹;生态承载力;生态供需平衡指数;时空动态;生态盈余;生态赤字

DOI: 10.18402/resci.2020.05.15

1 引言

经济增长是人类社会发展的显著特征之一,经济发展直接促进人类福利的提升。随着经济社会发展水平的提高,人类对自然系统所提供的食物、能源、原材料和健康福祉的需求越来越高^[1],如何平衡经济发展与自然环境之间的关系,使自然生态系统持续地为人类服务成为科学研究的关键议题。生态供给与生态需求的平衡是把握好社会与自然这对关系的切入点。研究生态供给与生态需求之间的平衡关系能够为城市与区域生态规划提供重要参考,也是生态文明建设理论研究的实践基础。

生态足迹是指人类占用的能够持续提供资源或消纳废物的、具有生物生产能力的地域空间^[2,3]。杨开忠等^[4]较早开展生态足迹研究,认为生态生产性土地为各类生态资本的度量提供了统一的度量

基础,并系统介绍了生态足迹理论基础、指标体系与计算方法。徐中民等^[5]指出生态足迹研究中,化石能源用地的处理、均衡因子与产量因子的计算是时容易引起误解与忽视的两个问题。此后,吴开亚等^[6]对生态足迹计算中的重要变量“全球公顷”与“国家公顷”进行了对比分析,认为国家以下尺度的统计分析用国家公顷较为合适;刘某某等^[7]运用净初级生产力(NPP)数据对中国各地生态足迹、生态承载力的均衡因子进行了系统的测算。Shah Saud等^[8]运用生态足迹指标来测量一带一路沿线国家间的生态恶化。Solarin等^[9]运用生态足迹测量1961—2014年间92个国家生态足迹的变化特征。国内多从省域尺度^[10,11]、地级市尺度^[12,13]、县域^[14]和乡镇尺度^[15]上揭示中国生态足迹时空演变与生态承载力状况。省级尺度上集中在水足迹^[16]、能源足迹^[17]、农

收稿日期:2019-08-23 修订日期:2019-12-23

基金项目:国家自然科学基金项目(31872688);中央高校基本科研业务费专项(201861049)。

作者简介:洪顺发,男,福建泉州人,硕士研究生,主要研究城市与区域规划。E-mail: hsfalir@163.com

通讯作者:郭青海,男,河南浚县人,博士,特聘教授,主要研究景观生态学、城市生态学和城乡可持续发展。E-mail: qhguo@zstu.edu.cn

2020年5月

产品生态足迹^[18],或者利用截面数据开展省域间生态足迹研究^[19]。尽管也有学者在全国尺度上对生态足迹时空演变进行研究^[20],然而在时间序列上多为单一省份研究^[10,11],且较少运用面板数据进行研究。省域间综合生态足迹与生态承载力供给与需求的实证研究仍然缺乏,而省级行政单位上的分析却是中央政策制定的重要依据。

对生态足迹理论的研究较为丰富,但在应用层面,尤其是生态足迹与生态承载力计算仍有待改进。首先,在生态足迹指标账户的能源足迹核算方面,原油是“中间产品”,主要的碳排放是由原油制成的成品油燃烧过程产生,有学者将原油作为所有油类产品使用纳入能源足迹的计算中^[21,22],这会使能源足迹的计算在空间上错配;也有研究将中间产品原油与汽油、柴油、液化石油气等成品油混合计算^[23,24],会使能源足迹在空间上错配和重复计算。有研究认为水电站建造占用的是耕地,将水电消耗转化为对耕地资源的占用,因而计算水电消耗对生态生产性土地的占用在生态足迹核算中具有一定的合理性^[21]。但是,水电对耕地的占用已经表现为生态承载力的减小,计算水电对耕地的占用在生态赤字/盈余的计算中会扩大生态赤字。其次,在污染足迹核算方面,焦雯珺等^[25]拓展出基于生态资源供给与废弃物吸纳两大类服务的生态足迹模型,能够对生态足迹的核算实践提供指导。然而,在生态供需平衡状况的应用研究中较少将污染足迹纳入生态足迹账户中计算,实际上这会“低估”人类活动的生态占用。再次,在生态承载力核算中,土地利用具有兼容性,尤其是耕地,在生物资源供给与碳吸收用地上高度“重合”,因而耕地宜计算“两块地”,避免低估生态承载力。

因此,本文借鉴现有理论与实践研究,构建生态足迹账户,分析中国省级生态足迹和生态承载力的时空格局,进而分析生态供需平衡状况,以期为中国城市与区域生态规划的制定提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

生物资源数据来自《中国农业年鉴》《中国林业年鉴》以及各省(市)统计年鉴。能源数据来自于《中国能源统计年鉴》。废水、废气、固体废弃物数据来自于国家统计局网站年度数据(<http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>)。土地利用数据、NPP数据、中国省级行政边界数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。其中,重庆市于1997年设立为直辖市,部分1995年统计资料欠缺,以1997年代替;港澳台和西藏因统计数据未能获取,不参与计算。

2.2 生态足迹与生态承载力评价方法

2.2.1 生态足迹

本文参考借鉴刘东等^[21]的研究方法,对生态足迹计算作了调整。第一,计量单位采用国家公顷^[6]。第二,本文计算的是基于土地占用^[26]的生态足迹,占用本地生态生产性土地就将其计入本省份的生态足迹,从而使生态足迹的计算更加能够反映生态压力。生物资源占用生态生产性土地体现在生产端,能源体现在消费端,因而,本文在生物资源端采用生产数据而非消费数据,而能源端采用了消费数据而非生产数据。第三,不计算水电、建成区生态足迹。建成区面积的增加表现为耕地的减少,其对生态环境影响已经反映在生态承载力的减少,计算建成区生态足迹会造成总生态足迹偏大。第四,将污染足迹加入生态足迹账户(表1)。

总生态足迹由生物生态足迹(Biology Ecological FootPrint, BEF)、能源生态足迹(Energy Ecological FootPrint, EEF)和污染生态足迹(Pollution Ecological FootPrint, PEF)构成,公式表示如下:

$$EF = BEF + EEF + PEF \quad (1)$$

表1 生态足迹账户

Table 1 Ecological footprint accounts

生态生产性 土地类型	生态足迹核算项目
耕地	谷物、豆类、薯类、花生、油菜籽、芝麻、向日葵、胡麻籽、棉花、麻类、烟叶、甘蔗、甜菜、蔬菜、猪肉、牛肉(饲养86%)、羊肉(饲养57%)、牛奶(饲养72%)
林地	桃子、梨、柑橘类、葡萄、红枣、柿子、苹果、香蕉、猕猴桃、石榴、菠萝、荔枝、芒果、油桐籽、乌桕籽、五倍籽、板栗、茶叶、蚕茧、核桃、竹笋干、棕片、生漆、橡胶、咖啡、椰子、腰果、剑麻、木材、竹材
草地	牛肉(放牧14%)、羊肉(放牧43%)、牛奶(放牧28%)
水域	淡水捕捞水产品、淡水养殖水产品
化石能源用地	煤炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气
污染消纳用地	工业废水、工业废气(SO ₂)、固体废弃物

注:牛肉、羊肉、牛奶括号内比例分别为占用耕地和草地的比例。

(1)生物生态足迹。生物生态足迹即耕地、林地、草地、水域中生物资源消耗总的生态足迹。其计算方式为:

$$BEF = \sum_{j=1}^4 (B_j \cdot \sum_i \frac{c_i}{p_i}) \quad (2)$$

式中: BEF 为生物生态足迹; j 为生态生产性土地类型, 包括耕地、林地、草地、水域; B_j 为第 j 类土地利用的均衡因子, 用以将具有不同生产力的土地类型转化为可比较的土地面积; i 为核算项目的类型; c_i 为 i 类生物资源核算项目的总量; $\overline{p_i}$ 为第 i 类核算项目的全国平均产量。其中牛肉、羊肉、牛奶分为饲养和放牧两类, 分别占用耕地和草地^[27]。

(2)能源生态足迹。本文采用“碳汇法”计算化石能源用地的生态足迹。化石能源用地的核算项目中选用的是最终产品, 包括煤炭、汽油、煤油、燃料油、天然气, 而原油是中间产品, 为了防止生态足迹重复计算, 不将其纳入核算项目。

$$EEF = \frac{n_i \cdot ec}{ep} \quad (3)$$

式中: EEF 为能源生态足迹; n_i 为第 i 类能源核算项目的总量; ec 为能源碳排放系数; ep 为生态生产性土地的平均碳吸纳能力。参考已有研究^[27], 煤、汽油、煤油、柴油、燃料油的 ec 值分别取 0.57、0.85、0.88、0.87、0.85 tC/t, 天然气的 ec 值取 0.00047 tC/m³; ep 值取 4.45 hm²/tC。

(3)污染生态足迹。有学者将污染纳入生态足迹的计算, 对污染足迹概念、模型构建与计算方法进行了阐述^[28]。本文借鉴白钰等^[29]的研究, 选择工业废水、工业废气(SO₂)、固体废弃物作为污染足迹的核算项目。其中, 污染生态足迹的计算公式为:

$$PEF = \sum_i \frac{u_i}{e_i} \quad (4)$$

式中: PEF 为污染生态足迹; u_i 为第 i 类污染核算项目的总量; e_i 为第 i 类污染项目的净化系数: 中国单位水域对污水的平均消纳量为 365 t/hm², 单位林地对 SO₂ 的吸附能力为 152.05 kg/hm², 单位面积土地能堆积的固体废弃物量为 109000 t/hm²^[29-31]。

2.2.2 生态承载力

净初级生产力(NPP)是指绿色植被在单位时间、面积上通过光合作用同化 CO₂ 的产物, 扣除自养呼吸消耗后的剩余有机物^[32]。本文借鉴已有研究^[7,33], 测算了 2000 年、2005 年和 2010 年中国 30 个省级区

域土地类型的产量因子, 由于土地生产力具有一定的稳定性, 文中仅呈现 2010 年的数据(表 2)。由于 1995 年和 2015 年 NPP 数据无法获取, 1995 年数据用 2000 年 NPP 数据代替, 2015 年数据用 2010 年 NPP 数据代替。其计算公式为:

$$YF_j = \frac{NPP_j}{\overline{NPP_j}} \quad (5)$$

式中: YF_j 为某一省份第 j 类生态生产性土地类型的产量因子; NPP_j 为某一省份的第 j 类土地类型的 NPP; $\overline{NPP_j}$ 是对应土地类型的全国平均 NPP。

生态承载力(Ecological Carrying Capacity, EC)

表 2 2010 年中国 30 省(市、区)各土地类型产量因子

Table 2 Productivity factor of different land use types in 30 provinces (municipalities, autonomous regions) in China, 2010

省份	耕地	林地	草地	水域
上海	0.84	0.60	2.26	1.24
安徽	1.53	1.31	5.04	1.56
湖南	1.25	1.05	4.52	1.90
天津	0.76	0.67	2.18	0.80
河北	0.75	0.71	2.31	0.96
山西	0.47	0.58	1.50	0.56
重庆	1.24	0.85	4.07	1.58
宁夏	0.14	0.17	0.29	0.16
陕西	0.97	1.07	4.05	1.18
江苏	1.43	0.92	2.91	1.54
河南	1.43	1.07	3.39	1.69
山东	0.96	0.53	2.57	1.10
云南	1.16	1.07	4.01	1.36
贵州	0.79	0.64	2.80	1.26
江西	1.34	1.34	4.79	1.59
辽宁	0.94	0.88	2.76	1.21
甘肃	0.33	0.59	1.27	0.40
浙江	1.32	1.55	7.04	1.61
福建	2.01	1.79	8.50	2.21
广西	1.08	1.10	4.08	1.71
青海	0.20	0.24	0.47	0.08
内蒙古	0.31	0.62	0.61	0.23
吉林	0.94	1.11	2.40	1.18
黑龙江	0.99	1.07	4.06	1.04
湖北	1.50	1.11	4.74	1.83
广东	1.26	1.58	5.75	1.67
海南	1.13	1.68	8.02	1.99
北京	0.73	0.91	3.85	1.06
四川	1.37	0.69	2.10	1.52
新疆	0.21	0.12	0.20	0.09

2020年5月

计算方法为:

$$EC = \sum P_j \cdot B_j \cdot YF_j \cdot A_j \quad (6)$$

其中: A_j 为第 j 类生态生产性土地类型的面积; P_j 是指第 j 类生态生产性土地能够用于为人类提供生态系统服务所占的比例; B_j 为第 j 类生态生产性土地的均衡因子,取值为:耕地 1.74、林地 1.41、草地 0.44、水域 0.35、能源用地 1.41^[34]。研究区水生态承载力扣除 60%用于维持生态环境和生态承载力^[35]。

传统生态足迹模型假设各类土地的空间存在“互斥性”,然而,由于生态生产性土地提供生态系统服务具有多样性^[36],忽略用地功能的兼容性^[37],会使得土地承载力测算偏低,最终“高估”生态超载状况。本文采用“叠加”^[38]的方式,将耕地的碳吸收能力加入到生态承载力的核算中。耕地在全球碳循环中具有重要的位置^[39],即耕地能够同时提供生物资源用地和“碳吸收”用地,具体计算中将耕地生态承载力双倍计算。然而,林地、草地在提供生物资源生态生产性土地与碳吸收生态生产性土地之间存在兼容,但其兼容性较小,现有理论研究基础还不足以支撑其精确计算,简单叠加会使生态承载力计算误差偏大。

2.2.3 生态供需平衡指数

在生态足迹(需求)和生态承载力(供给)状况进行评价的基础上,借鉴生态供需平衡指数(Ecological Carrying Capacity Supply and Demand Balance Index, ECCI)^[40,21]。ECCI是生态足迹(EF)与生态承载力(EC)的比值,反映了生态需求(生态足迹)和生态供给(生态承载力)对比关系。

$$ECCI = \frac{EF}{EC} \quad (6)$$

当ECCI等于1时,该地区处于可持续发展与不可可持续发展的临界点,生活方式、生产方式的轻微转变都容易引发该地区可持续发展状态的改变,称为生态临界区。由于生态足迹与生态承载力几乎不可能完全相等,本文将ECCI上下浮动10%的范围内都称为生态临界区,即 $0.9 < ECCI < 1.1$ 时为生态临界区。当ECCI大于1.1时,生态足迹大于生态承载力,该地区人类活动对生态资本的索取(生态足迹)已经超过生态供给(生态承载力),需要不断消耗生态“本金”来支持区域的发展,处于不可持续的状态,称为生态赤字区。当ECCI小于0.9时,生态足迹小于生态承载力,呈现出生态盈余,该区域剩余一定

的生态资本留作未来开发利用,处于可持续发展状态,称为生态盈余区。本文根据生态临界区、生态赤字区、生态盈余区ECCI值与平均值的关系进一步细分。例如,生态赤字区ECCI均值为2.8,因此将 $ECCI > 2.8$ 划定为严重超载,具体划分详见表3。

3 结果分析

3.1 生态足迹时空动态

生态足迹基本形成以“东部>中部>西部”的“阶梯化”格局(图1)。1995—2000年,上海—江苏—山东—天津—北京一线是地均生态足迹的高值区;2005—2015年,生态足迹高值区逐渐向该线西部、南部蔓延,表现为环渤海地区、长江三角洲地区生态足迹不断增加,珠江三角洲也出现了明显的增长,其中广东省生态足迹增长了68%。2000—2005年是中国生态足迹“高速增长”时期,全国所有省份生态足迹增长速度普遍显著高于其他时期。2005年以后,全国多数省份生态足迹增速放缓,尤其东部生态足迹较高的地区放缓幅度较大。较为典型的是北京、上海这两个生态足迹高值区出现了生态足迹减小,分别下降了24%和29%。

3.2 生态承载力时空动态

中国生态承载力呈现出“局部调整,整体稳定”的时空特征(图2)。生态承载力上涨较为明显的集中在西北到东北一线,新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河北、天津、辽宁1995—2015年生态承载力上涨15%以上。生态承载力下降的地区主要集中在长江以南地区,其中四川、贵州、重庆、上海生态承载力下降超过15%,广西、湖南、云南、福建、浙江生态承

表3 基于ECCI的中国生态供需平衡分类(级)评价标准

Table 3 Evaluation criteria of China's ecological carrying capacity supply and demand balance (grade) based on Ecological Carrying Capacity Supply and Demand Balance Index (ECCI)

类型	生态承载状况	ECCI
生态盈余区	高度盈余	$ECCI \leq 0.5$
	中度盈余	$0.5 < ECCI \leq 0.7$
	轻度盈余	$0.7 < ECCI \leq 0.9$
生态临界区	平衡有余	$0.9 < ECCI \leq 1.0$
	临界超载	$1.0 < ECCI \leq 1.1$
生态赤字区	轻度超载	$1.1 < ECCI \leq 1.8$
	中度超载	$1.8 < ECCI \leq 2.8$
	高度超载	$ECCI > 2.8$

注:根据刘东等^[21]修改重绘。

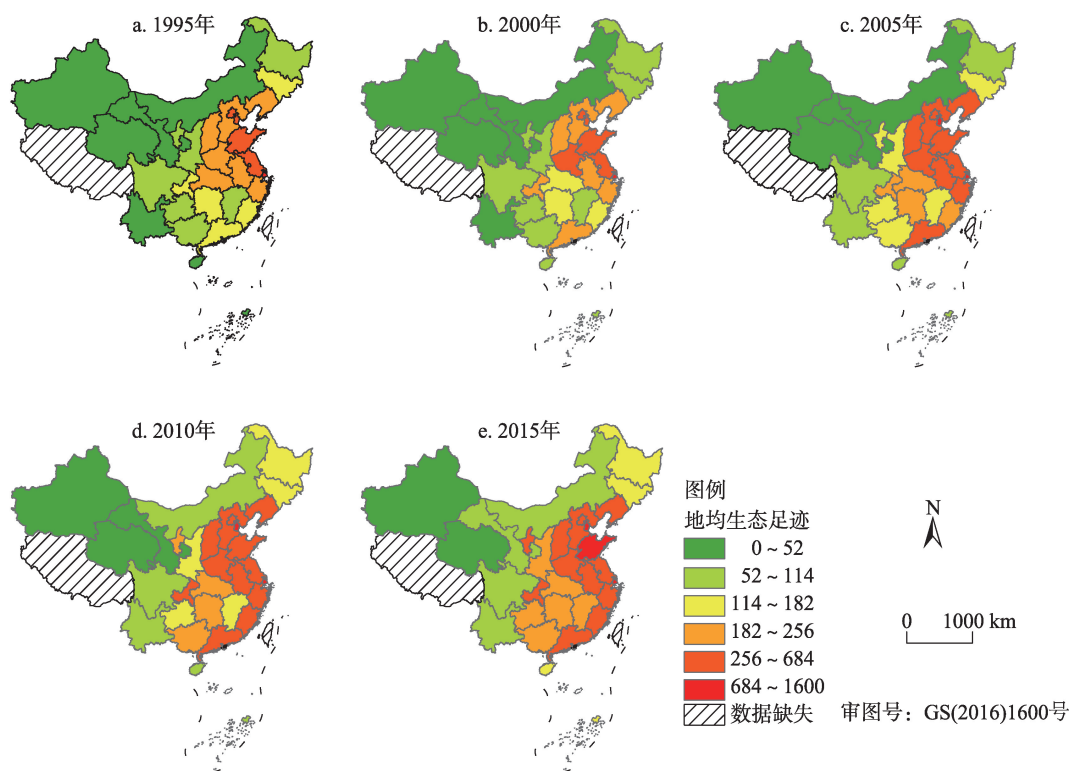


图1 1995—2015年中国30省(市、区)地均生态足迹

Figure 1 Ecological footprint of 30 provinces (municipalities, autonomous regions) in China, 1995-2015

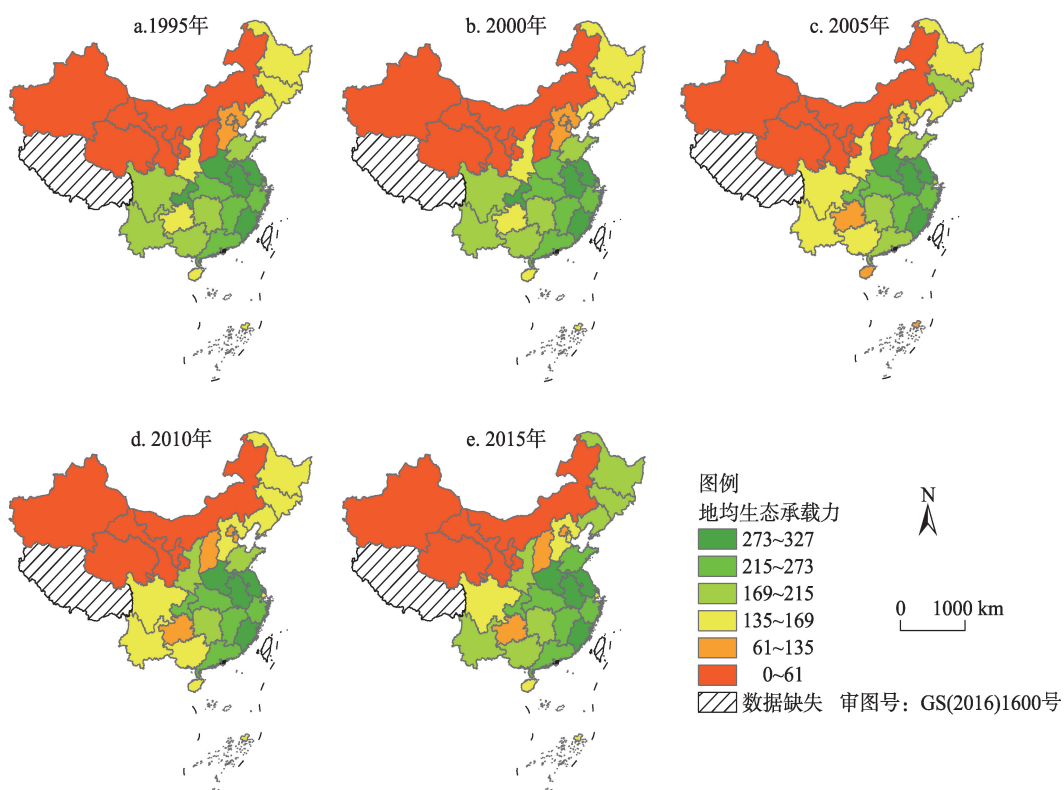


图2 1995—2015年中国30省(市、区)地均生态承载力

Figure 2 Ecological carrying capacity of 30 provinces (municipalities, autonomous regions) in China, 1995-2015

2020年5月

承载力下降5%~15%。生态承载力下降主要来源于耕地生态承载力下降,主要表现为快速城镇化过程中对耕地的占用。1995—2015年,耕地生态承载力下降最大的为云南、湖南、福建、贵州、四川、重庆、浙江、上海等;上升最大的为新疆、宁夏、甘肃、山西、青海等。

3.3 生态供需平衡分析

2000年和2005年是中国生态供需平衡状况“量变”和“质变”变化的关键节点。1995—2005年,中国整体生态供给大于生态需求。其中,1995年中国处于生态赤字区的省份有11个,而处于生态盈余区的省份有19个(图3)。1995、2000年 *ECCI* 值分别为0.76、0.79,此时中国生态供给仍有高于20%的剩余(图4)。2000—2005年生态供需平衡状况的变化速度明显加快,出现生态赤字的省区明显增多(图3,图5)。从省份的数量变化来看,中国整体生态供需逐渐失衡,呈“剪刀差”的变化趋势。2005年

ECCI 值为1.02,处于生态临界超载区。而2010、2015年, *ECCI* 值分别为1.29、1.39,表示到2015年时生态需求已经超过了生态供给的39%。2015年,处于生态赤字区的省份有19个,而生态盈余区仅剩7个,越来越多省份进入生态临界区。2000—2005年生态失衡速度加快可能与中国加入世界贸易组织扩大开放有关,与史丹等^[26]的研究结果吻合。中国加入世界贸易组织后,经济进一步对外开放,经济发展加速,对各类生物资源、能源的消耗快速上涨,产生较多的生态足迹。

东部地区生态超载状况(*ECCI*)远高于中、西部平均水平,且逐渐加重(图4)。东部地区在1995—2000年属于轻度超载,超载速度变化较小;2000年后,东部地区生态超载速度明显加快,2000—2010年生态供需平衡指数由1.3增加到2.0;2010年后超载速度明显放缓,2015年整体上仍处于严重超载状况。如图5所示,东部地区的南北差异明显,上海以北至辽宁的东部沿海地区全部呈现生态赤字。其中,1995年北京(4.24)、天津(5.57)、上海(6.30)属于严重超载,山东中度超载(1.91),辽宁(1.42)、河北(1.64)、江苏(1.37)轻度超载。而浙江(0.84)、广东(0.69)、福建(0.38)、海南(0.33)则仍有生态盈余,其中福建、海南高度盈余。至2015年,北京生态供需平衡指数(3.11)有较大的下降,但仍属于严重超载。其余省(市)均有不同程度上升,如广东、浙江则由生态盈余转入生态赤字。福建、海南生态盈余减小,生态供需平衡指数分别变为0.89、0.78。

中部地区以2005年为关键结点,由生态盈余缓慢转入生态赤字(图4)。2005年中部整体上转入生态临界状态(1.0),而2010年转入生态赤字状态(1.1)。其中,山西是整个中部地区的生态足迹高值区,1995年生态供需平衡指数高达3.14,表明其生态消耗是生态供给的3倍多。如图5所示,河南、安徽分别在2005年和2010年进入生态超载状态;湖南、湖北、吉林于2005年进入生态临界状态;江西、黑龙江于2005年由高度盈余分别转入轻度盈余和中度盈余。

西部地区生态承载力供需状况恶化较严重,其中,西北地区生态供需状况恶化比西南地区严重。1995、2000年西部地区生态供需平衡指数分别为0.5和0.6,属于中度盈余状态,生态供需状况明显优

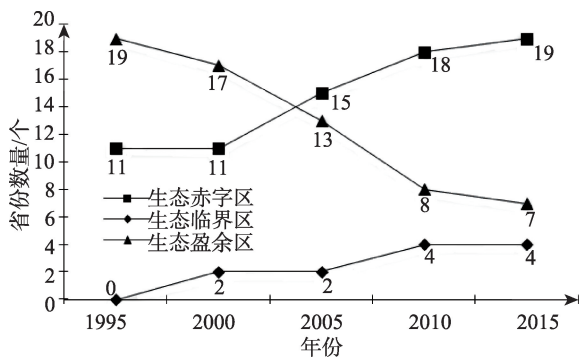


图3 1995—2015年中国各生态供需平衡类型省份数量统计

Figure 3 Statistics of provinces with different types of ecological supply and demand balance in China, 1995-2015

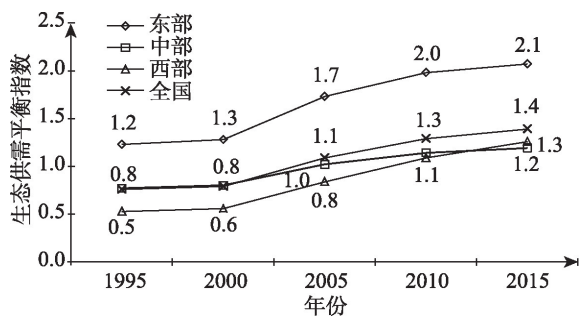


图4 1995—2015年中国东中西生态供需平衡指数

Figure 4 Ecological carrying capacity supply and demand balance index (*ECCI*) values of eastern, central, and western China, 1995-2015

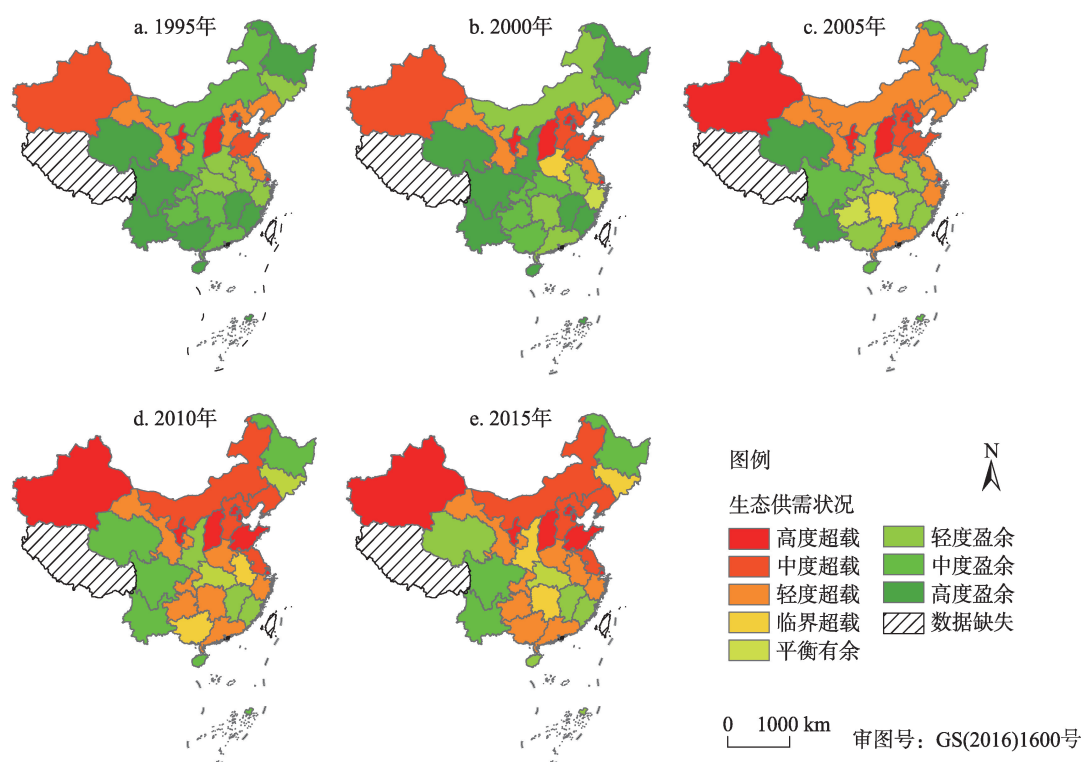


图5 1995—2015年中国30省(市、区)生态供需状况

Figure 5 Ecological supply and demand of 30 provinces (municipalities, autonomous regions) in China, 1995-2015

于东部和中部。然而,其生态供需状况变化速度也相对较快,2010年进入生态赤字区,与中部地区相当,2015年则生态超载超过中部地区。从具体省份来看(图5),1995年宁夏、甘肃、新疆已处于生态超载状态,其中,宁夏生态供需平衡指数高达16.69,人类活动强度与自然承载力严重失衡。内蒙古、贵州和重庆由生态盈余转入生态赤字。四川、云南、青海则是西部地区生态盈余区,其中四川、云南在2015年仍保持中度盈余的状态,是西部地区生态供给较多的地区。广西、陕西由高度盈余转入生态临界状态。

综上,1995—2015中国整体上由生态盈余转入生态赤字。东部地区生态超载远高于全国和中西部水平;而西部地区生态超载恶化速度较快。2015年,中国生态盈余的省份主要分布在东北(黑龙江)、东南(福建、江西)和西南(云南、四川)。

4 讨论、结论与政策建议

4.1 讨论

(1)中国生态超载状况被“高估”,表现为“高估”生态足迹和“低估”生态承载力。本文结果显示2015年整个中国ECCI值为1.39,即生态需求(生态

足迹)为生态供给(生态承载力)的1.39倍,以往研究发现^[26],中国对自然环境的索取要3.4个中国才能满足,这一结果与本文差距较大。可能的原因有两个方面:①生态足迹核算账户的差别。本文认为,水电站建设占用的耕地已经体现在生态承载力的减少上,将“水电”消耗当成占用“耕地”会造成生态超载结果偏大;建设用地确实会占用耕地,但已经表现为生态承载力的减少,再计算生态足迹会造成生态供需核算中使计算结果高估中国生态超载状况。②在生态承载力的计算中,耕地除了提供生物资源外,也应作为“碳吸收用地”加以计算。

(2)北京、上海生态供需状况转好是由于污染足迹的下降。污染足迹的加入使得生态足迹更贴切反映人类活动对自然的占用。2010年以后,北京、上海出现生态足迹下降,生态供需状况转好。上海生态足迹减小的83%得益于污染足迹减小,北京生态足迹减小的44%得益于污染足迹,24%得益于能源足迹减小。以往研究^[23]也发现北京生态足迹下降的趋势,然而,上海的研究结果却呈现平稳波动的趋势。由于上海市83%的生态足迹减小得益于污染足迹的减少,本文加入污染足迹后上海生态

2020年5月

足迹呈下降趋势。

(3)新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、福建、海南生态供需研究结果与已往研究有较大差异。2010年,新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、山西都处于生态赤字状态,福建、海南在本文中属于东部地区生态盈余较大的省区。而以往的研究^[21]发现2008年新疆、甘肃、宁夏、内蒙古和山西的大部分县级行政单元都仍具有较大的生态盈余,而福建、海南内绝大多数行政单元处于严重生态赤字状态,这与本文结果差异较大。可能的原因在于:①本文的产量因子 YF 由 NPP 数据计算获得,在反映地区植被生产力方面更具效率,因而出现新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、山西等中部、西北地区生态承载力偏高和福建、海南生态承载力计算低估的问题得以修正,即本文计算中新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、山西等中部、西北地区生态承载力比以往的研究低,而福建、海南所计算的生态承载力比以往的研究高。②本文将“污染足迹”纳入到生态足迹账户中。宁夏产业以传统产业、资源型产业为主^[41],山西则是以煤、焦、冶电等第二产业为主导的产业结构^[42],在纳入“污染足迹”的计算中,以资源高强度开发为经济发展模式的山西、宁夏呈现出严重超载特征。

(4)黑龙江、江西、福建、海南、四川、云南生态盈余的原因不同。其中,江西、福建2015年生态承载力分别为全国平均水平的2.0倍和2.7倍,然而二者的地均生态足迹也较高,分别是全国平均水平的1.2倍和1.7倍,这就导致生态供需平衡指数较大,属于高供给、高消耗下的生态盈余。黑龙江、云南、海南和四川的2015年生态承载力是全国平均水平的1.4~1.6倍,地均生态足迹分别为全国平均水平的60%~80%,其生态盈余的主要原因是生态需求较低,属于较低生态消耗型的生态盈余。

(5)本文存在的不足及研究展望。第一,耕地、林地、草地、水域等在生物资源的提供和其他功能上具有兼容性,但兼容性比例较小。为防止更大的误差,本文中未给予计算。未来可从不同土地利用类型的兼容性方面开展精确计算。第二,本文采取的是全国平均产量数据,然而由于地区间土地生产力不同,生产同一种产品,获得单位产量,生产力较低的地区需要占用更多的生态生产性土地,这将会体现在生态足迹结果上。本文中区域土地生产力差异已经在土地承载力这一维度用产量因子调整,

该误差不会体现在生态供需平衡计算结果上。第三,中国具有约1.8万km的海岸线,约300万km²的海洋国土,海洋资源丰富,本文在水产品计算上仅计算淡水产品和淡水水域的承载力,并未将海洋生态足迹和海洋生态承载力纳入计算。

4.2 结论

通过生态足迹、生态承载力和生态供需平衡的时空动态分析,得出以下结论:

(1)中国生态足迹在2000年后呈现快速上涨趋势。生态足迹呈现东部>中部>西部的“阶梯化”空间分布格局。生态承载力总体分布格局稳定,东部地区较高,西北部地区较低,与自然水热条件基本格局稳定相吻合;东部地区生态承载力下降显著高于其他地区,主要原因是耕地面积的减小。

(2)生态承载力供给与需求空间分布存在明显的不平衡。2005年前后是中国总体上由生态盈余走向生态赤字的关键节点。2015年,中国对自然环境的“占用”需要1.39个中国才能满足现有的生态需求。东部地区整体上生态超载明显高于中部、西部地区,环渤海地区表现最为显著。西部地区生态承载力基础较差,生态足迹的增长引起了西部地区生态超载状况加速,其中,宁夏、新疆生态超载严重,且生态足迹呈中高速增长,应引起重视。

(3)能源足迹和污染足迹的降低是改善生态供需平衡状况的关键内容。在城市的发展过程中,生物资源消耗量的增长是“刚需”,并且占总生态足迹的比例较小,削减生物资源消耗来降低生态足迹的方式会直接降低人类福利。能源足迹和污染足迹占总生态足迹的比例大,其增长直接影响人类生活环境。北京、上海生态足迹下降,生态超载放缓主要得益于能源足迹和污染足迹的降低。能源足迹和污染足迹的控制是改善生态供需状况,协调人类福利与自然环境良性互动的关键着力点。

4.3 政策建议

基于以上分析,提出改善中国生态供需状况的几条建议:

(1)东部地区生态承载力下降速度快,其主要原因是耕地占用速度过快,应建立严格的基本农田保护制度与有效的实施措施,限制东部较发达地区城市建设不合理侵占耕地。同时加强城市绿色空间建设,提高城市自身的生态供给能力。

(2)中国西北地区生态“底子薄”,整体生态环

境脆弱,对人类活动反应敏感,生态失衡加速,不宜布局高能耗、高污染的产业,其生态承载力有上涨趋势,应继续加强森林、草地、水域保护与建设,提高生态承载力。尤其是新疆、宁夏是生态高度超载的省份,且生态足迹仍处于中高速增长阶段,应引起格外重视。

(3)北京和上海因污染足迹、能源足迹的减小实现了生态供需状况的好转,是生态供需平衡改善的案例。江苏、浙江、广东等东部经济较为发达的地区应进一步改善本地区产业结构,提高生产技术水平,提高能源利用率和减少污染排放。山西、宁夏、辽宁等以传统资源型产业为主的地区应实现“新旧动能转换”,继续实施清洁生产。

参考文献(Reference):

- [1] Lan J, Malik A, Lenzen M, et al. A structural decomposition analysis of global energy footprints[J]. *Applied Energy*, 2016, 163: 436–451.
- [2] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Focus*, 1992, 6(2): 121–130.
- [3] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375–390.
- [4] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 630–636. [Yang K Z, Yang Y, Chen J. Ecological footprint analysis: Concept, method and cases[J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(6): 630–636.]
- [5] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 69–78. [Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. A resolution to the conception of ecological footprint [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(6): 69–78.]
- [6] 吴开亚, 王玲杰. 基于全球公顷和国家公顷的生态足迹核算差异分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(5): 80–83. [Wu K Y, Wang L J. Accounting discrepancies of ecological footprint based on global hectare and national hectare[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(5): 80–83.]
- [7] 刘某承, 李文华, 谢高地. 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*, 2010, 29(3): 592–597. [Liu M C, Li W H, Xie G D. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 592–597.]
- [8] Saud S, Chen S S, Haseeb A, et al. The role of financial development and globalization in the environment: Accounting ecological footprint indicators for selected one-belt-one-road initiative countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119518.
- [9] Solarin S A, Tiwari A K, Bello M O. A multi-country convergence analysis of ecological footprint and its components[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 46: 1–10.
- [10] 焦士兴, 王安周, 陈林芳, 等. 河南省水生态足迹测度及其驱动效应分析[J]. *水文*, 2020, 40(1): 91–96. [Jiao S X, Wang A Z, Chen L F, et al. Analysis of water ecological footprint and its driving effects in Henan Province[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(1): 91–96.]
- [11] Yang Y, Hu D. Natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: A case study in northern Shaanxi, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 178–188.
- [12] 赵正, 宁静, 周非飞, 等. 基于生态足迹模型的资源型城市生态承载力评价: 以黑龙江省大庆市为例[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 281–287. [Zhao Z, Ning J, Zhou F F, et al. Evaluation of ecological carrying capacity of resource cities based on ecological footprint model: A case study at Daqing City, Heilongjiang Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 281–287.]
- [13] Peng W J, Wang X M, Li X K, et al. Sustainability evaluation based on the energy ecological footprint method: A case study of Qingdao, China, from 2004 to 2014[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 1249–1261.
- [14] 鲁洋, 沈宜菁, 黄素珍, 等. 基于生态足迹理论的休宁县可持续发展评价研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2019, 58(6): 756–764. [Lu Y, Shen Y J, Huang S Z, et al. Research on sustainable development evaluation of Xiuning County based on ecological footprint theory[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2019, 58(6): 756–764.]
- [15] 王宏卫, 安秀峰, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 基于乡镇尺度的克里雅河绿洲生态承载力分析: 以于田县13个乡镇生态承载力为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(10): 48–55. [Wang H W, An X F, Taxifulati T, et al. Assessment on the ecological carrying capacity of towns in Yutian County[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(10): 48–55.]
- [16] 陆砚池, 方世明. 中国省域水资源生态足迹格局均衡性研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 289–297. [Lu Y C, Fang S M. Study on equilibrium of ecological footprint pattern of provincial water resources in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 289–297.]
- [17] 周倩, 余兴厚, 李文华, 等. 长江经济带能源生态足迹空间效应分析: 基于区域分工视角[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(12): 1685–1692. [Zhou Q, Yu X H, Li W H, et al. Analysis on spatial effect of energy ecological footprint in Changjiang River Economic Belt: Based on regional division of labor[J]. *Resource Development & Market*, 2018, 34(12): 1685–1692.]
- [18] 罗海平, 朱勤勤, 罗逸伦, 等. 耕地生态足迹与生态承载力研究: 基于中国粮食主产区2007–2016年面板数据[J]. *华东经济管理*, 2019, 33(5): 68–75. [Luo H P, Zhu Q Q, Luo Y L, et al. Study

2020年5月

- on the ecological footprint and ecological capacity of cultivated land: Based on the panel data of main grain producing areas of China 2007–2016[J]. East China Economic Management, 2019, 33(5): 68–75.]
- [19] 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[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1084–1089. [Zhang K Y, Fu S X, Zhang W B. Ecological carrying capacity of 31 provinces based on improved ecological footprint model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(9): 1084–1089.]
- [20] 黄宝荣, 崔书红, 李颖明. 中国2000–2010年生态足迹变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 420–426. [Huang B R, Cui S H, Li Y M. Ecological footprint evolution characteristics and its influencing factors in China from 2000 to 2010[J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 420–426.]
- [21] 刘东, 封志明, 杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 614–624. [Liu D, Feng Z M, Yang Y Z. Ecological balance between supply and demand in china using ecological footprint method[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(4): 614–624.]
- [22] 田杰, 姚顺波. 基于生态足迹模型的陕西省可持续发展动态研究[J]. 中国科技论坛, 2014, (1): 114–120. [Tian J, Yao S B. Dynamic analysis of sustainable development based on ecological footprint model in Shaanxi Province[J]. Forum on Science and Technology in China, 2014, (1): 114–120.]
- [23] 胡正李, 葛建平, 韩爱萍. 中国大都市生态足迹的比较研究: 以北京、上海、天津和重庆为例[J]. 现代城市研究, 2017, (2): 84–93. [Hu Z L, Ge J P, Han A P. A comparative study of Chinese metropolis ecological footprint: The case of Beijing, Shanghai, Tianjin and Chongqing[J]. Modern Urban Research, 2017, (2): 84–93.]
- [24] 郑晖, 石培基, 何娟娟. 甘肃省生态足迹与生态承载力动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 13–18. [Zheng H, Shi P J, He J J. The dynamic analysis on ecological footprint and ecological capacity of Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(10): 13–18.]
- [25] 焦雯珺, 闵庆文, 李文华, 等. 基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2392–2400. [Jiao W J, Min Q W, Li W H, et al. 2014. Development and application of ecosystem–service–based ecological footprint models[J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2392–2400.]
- [26] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, 2016, (5): 5–21. [Shi D, Wang J J. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint[J]. China Industrial Economics, 2016, (5): 5–21.]
- [27] 谢鸿宇. 生态足迹评价模型的改进与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. [Xie H Y. Improvement and Application of Ecological Footprint Evaluation Model[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.]
- [28] 闵庆文, 焦雯珺, 成升魁. 污染足迹: 一种基于生态系统服务的生态足迹[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 195–200. [Min Q W, Jiao W J, Cheng S K. Pollution footprint: A type of ecological footprint based on ecosystem services[J]. Resources Science, 2011, 33(2): 195–200.]
- [29] 白钰, 曾辉, 魏建兵, 等. 基于环境污染账户核算的生态足迹模型优化: 以珠江三角洲城市群为例[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1789–1796. [Bai Y, Zeng H, Wei J B, et al. Optimization of ecological footprint model based on environmental pollution accounts: A case study in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(8): 1789–1796.]
- [30] 王建龙, 文湘华. 现代环境生物技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. [Wang J L, Wen X H. Modern Environmental Biotechnology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.]
- [31] 彭建, 王仰麟, 陈燕飞, 等. 城市生态系统服务功能价值评估初探: 以深圳市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, (4): 594–604. [Peng J, Wang Y L, Chen Y F, et al. Economic value of urban ecosystem services: A case study in Shenzhen[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, (4): 594–604.]
- [32] 洪长桥, 金晓斌, 陈昌春, 等. 集成遥感数据的陆地净初级生产力估算模型研究综述[J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 924–939. [Hong C Q, Jin X B, Chen C C, et al. Overview on estimation models of land net primary productivity integrating remote sensing data [J]. Progress in Geography, 2017, 36(8): 924–939.]
- [33] Liu M C, Zhang D, Min Q W, et al. The calculation of productivity factor for ecological footprints in China: A methodological note[J]. Ecological Indicators, 2014, 38: 124–129.
- [34] 刘某承. 中国生态足迹的时间动态与空间格局[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014. [Liu M C. Temporal Dynamics and Spatial Patterns of China's Ecological Footprints[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.]
- [35] 张义. 基于生态系统服务的水生态足迹初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(4): 502–508. [Zhang Y. Preliminary study on water ecological footprint of water based on ecosystem services [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(4): 502–508.]
- [36] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 等. 生态足迹的模型修正与方法改进[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4592–4603. [Zhou T, Wang Y P, Gong J Z, et al. Ecological footprint model modification and method improvement[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4592–4603.]
- [37] 李明月. 生态足迹分析模型假设条件的缺陷浅析[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(2): 129–131. [Li M Y. A brier analysis of hypothesis of ecological footprint model[J]. China Population, Resources and Environment, 2005, 15(2): 129–131.]
- [38] 宫盛男, 张玉坤, 张睿, 等. 基于打破“空间互斥性”假设的既有城市生态足迹分析研究[J]. 城市发展研究, 2018, 25(1): 7–14. [Gong S N, Zhang Y K, Zhang R, et al. Research on the analysis of urban ecological footprint by breaking the “space mutex” hypothetical[J]. Urban Development Studies, 2018, 25(1): 7–14.]
- [39] 尹钰莹, 郝晋珉, 牛灵安, 等. 河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 918–928. [Yin Y Y, Hao J M, Niu L A, et al. Carbon cycle and carbon efficiency of

- farmland ecosystems in Quzhou, Hebei Province[J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 918–928.]
- [40] 吴隆杰. 基于生态足迹指数的中国可持续发展动态评估[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(6): 94–99. [Wu L J. Dynamic evaluation of China sustainable development based on the ecological footprint index[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(6): 94–99.]
- [41] 史成泽. 新常态下宁夏经济供给侧结构性改革的路径选择[J]. 宁夏社会科学, 2017, (S1): 26–31. [Shi C Z. The path choice of the structural reform of Ningxia's economic supply side under the new normality[J]. *Social Sciences in Ningxia*, 2017, (S1): 26–31.]
- [42] 史贞, 许佛平. 山西省产业转型升级机理探析: 基于投入产出分析[J]. 经济问题, 2018, (10): 72–77. [Shi Z, Xu F P. Analysis on the mechanism of Shanxi's industrial transformation and upgrading: Based on input-output approach[J]. *On Economic Problems*, 2018, (10): 72–77.]

Spatiotemporal dynamics of ecological supply and demand based on ecological footprint theory

HONG Shunfa¹, GUO Qinghai², LI Dawei³

(1. School of International Affairs and Public Administration, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

3. School of Geographic Science and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The balance of ecological supply and demand is a scientific question in the field of ecological civilization research, and a practical basis for the construction of ecological civilization. Because of its social-ecological attributes and measurability, ecological footprint has become an entry point in the study of the linkages between ecological supply and ecological demand. Based on the ecological footprint theory, an ecological footprint account was constructed in this study and ecological footprint and ecological carrying capacity calculation methods were optimized for the evaluation of ecological supply and demand in China during 1995–2015. The results show that: (1) Ecological footprint had grown rapidly since 2000, and finally formed a stepped pattern of decrease from the eastern to the central and western regions. The ecological carrying capacity was locally adjusted and the pattern was stable. (2) Ecological supply and demand situation had undergone qualitative change around 2005 in China, shifting from ecological surplus to ecological deficit. Up to 2015, the occupation of the natural environment required 1.39 China to meet existing ecological needs. (3) The ecological overload in the eastern region was much larger than in other regions. The ecological carrying capacity of the western region was poor, and the growth of ecological footprint had caused the acceleration of ecological overload in the western region. Among the western provinces (municipalities, autonomous regions), Ningxia and Xinjiang had serious ecological overload, and the ecological footprint was growing at a medium and high speed, which should be paid special attention. (4) The control of energy footprint and pollution footprint is the core to improve the balance of regional ecological supply and demand. The research results can provide some reference for regional ecological civilization construction and ecological planning in China.

Key words: ecological footprint; ecological carrying capacity; ECCI; spatiotemporal dynamics; ecological surplus; ecological deficit