

DOI: 10.5846/stxb201311182756

周涛, 王云鹏, 龚健周, 王芳, 冯艳芬. 生态足迹的模型修正与方法改进. 生态学报, 2015, 35(14): 4592-4603.

Zhou T, Wang Y P, Gong J Z, Wang F, Feng Y F. Ecological footprint model modification and method improvement. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4592-4603.

生态足迹的模型修正与方法改进

周 涛^{1,2,3}, 王云鹏^{1,*}, 龚健周², 王 芳², 冯艳芬²

1 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2 广州大学地理科学学院, 广州 510006

3 中国科学院大学研究生院, 北京 100049

摘要:生态足迹是测定人类活动的资源消费需求, 判定自然资源是否被过度利用的有效工具。介绍了生态足迹的基本概念和模型, 简单分析基本模型存在的主要缺陷和争论, 重点解析了近年来生态足迹模型在参数调整、项目计算、账户扩展等方面的演变和修正。介绍生态足迹研究的传统方法: 综合法和组分法, 评述了生命周期评价, 基于投入产出分析, 三维模型, 净初级生产力, 能值理论, 时序分析等的方法改进。对未来的研究方向提出自己的看法, 期望对我国的生态足迹研究有一定的启示作用。

关键词:生态足迹; 生态承载力; 模型修正; 方法改进

Ecological footprint model modification and method improvement

ZHOU Tao^{1,2,3}, WANG Yunpeng^{1,*}, GONG Jianzhou², WANG Fang², FENG Yanfen²

1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2 School of Geographical Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Ecological Footprint (EF) method, originally developed by Wackernagel and Rees in the mid 1990s, is a useful approach to determine human sustainability. EF can measure human demand on bioproductive land area that is required to support resource demands of a given population or specific activities, and identify whether natural assets have been overly exploited. The aim of this paper is to elaborate and analyze the progress of EF modeling and methods in recent research. First, we explain the basic EF model and the concepts of ecological footprint, biological capacity, ecological remainder and ecological deficit. Second, we comment on major defects and controversies of the basic model. One example of this is the assumption that biologically productive land use types are a mutually exclusive, partial index of the ecological accounting, which overlooks the complexity of land quality or ecological function and ignores the influence of socioeconomic factors on the productivity of land. More importantly, we discuss evolution and modification of the EF model in recent years, which includes three aspects: parameter adjustment (equivalence factor and yield factor), item calculation (energy land, cropland, fishing ground, and built-up land), and accounting extension (carbon footprint, water footprint, pollution footprint, and ore resource footprint). Third, after introducing the two main conventional EF methods (the compound and component-based approaches), we comment on EF methodology improvement based on life cycle assessment (LCA), input-output analysis, three-dimensional modeling, net primary productivity, emergy theory, time series analysis, and others. Key issues from the method review are as follows. (1) The LCA method can be applied to the EF of a final product. LCA-EF has the advantage of detail, as individual product types and even brands can be analyzed, with the general disadvantage of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41001048)

收稿日期: 2013-11-18; 网络出版日期: 2014-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyp@gig.ac.cn

lacking complete upstream coverage of the production chain. (2) The main advantage of input-output based EF analysis lies in its unambiguous and consistent accounting of all upstream life-cycle impacts and good availability of expenditure data that permit fine spatial, temporal and socioeconomic breakdown of consumption footprints. (3) The 3D EF model can help distinguish between the use of natural capital flows and the depletion of natural capital stocks, while maintaining the structure and advantages of the classical EF formulation. (4) Basing bioproductivity calculations on Net Primary Production (NPP) is a promising approach that provides an explicit link between human consumption and ecosystem services. EF-NPP relates land overuse to land productivity, whereas the overshoot measured by the EF alone results in essence from a translation of carbon dioxide emissions into virtual land. (5) The EF approach based on energy provides a method by which it is not necessary to consider equivalence factors that are controversial in the accounting of conventional EF. However, the transformity for products or processes is difficult and uncertain because of the complexity of ecosystems, which affects the reliability of conclusions at high levels of detail. (6) Time-series footprint studies can show the benefits and pitfalls of previous practices and illuminate the effects of economic/demographic growth on EFs via historical analysis. Finally, future research directions are presented, with an aim to inform EF research in China.

Key Words: ecological footprint (EF); biological capacity (BC); model modification; method improvement

生态足迹(EF)的概念是1992年William Rees提出并主要由他的学生Wackernagel逐渐完善的^[1]。生态足迹方法通过比较人类活动消耗的自然资源与自然生态系统所提供的生态承载力(BC),定量的判断研究区域的可持续发展状态^[2]。生态足迹概念提出后,由于其概念清晰,计算方便,分析结果直观且具有可比性,很快受到了各研究机构、国际组织、政府部门乃至社会公众的广泛关注,成为当今可持续发展研究中的热门领域。本文将回顾生态足迹研究的基本模型,简单分析基本模型存在的主要缺陷和争论,重点解析模型的改进和方法的修正,最后展望未来的研究方向,以期对我国的生态足迹研究起到一定的启示作用。

1 生态足迹基本模型的修正

生态足迹的基本模型包括三个方面:一是生态足迹的计算;其次是生态承载力的计算;最后是生态足迹与生态承载力的比较。就全球尺度而言,当 $EF > BC$ 时,意味着人类对自然资源的过度利用,产生了生态透支,是一种不可持续的资源消费,反之,则表明对自然资源的利用程度没有超出其更新速率,处于生态盈余中^[3-6]。

生态足迹基本模型将人类对各种自然资源的需求量及自然界相应的供应能力通过引入均衡因子和产量因子统一量化为“全球公顷”为单位的“生物生产性土地”,提供了全球可比的、简单有用的资源可持续利用评价手段。但是在研究和应用过程中,发现基本模型存在一些缺陷或者具有争议的地方^[7-11],如假设各类土地在空间上是互斥的,忽略土地功能的多样性和一定程度上的功能替代性;账户涵盖不全面,没有把自然系统提供资源、消纳废弃物的功能描述完全;将各区域产量调整为世界平均产量掩盖了不同区域的特殊性;过于强调土地的生产性及其数量,缺乏对土地生态功能与质量的关注;归一化的单个指标不能全面度量和评价复杂的社会-经济-环境-生态系统。

针对基本模型的缺陷,研究者们从不同角度提出了解决方法,例如:基于净初级生产力(NPP)设定均衡因子,以体现土地的生态功能;根据区域特征调整产量因子,解决区域信息丢失的问题;提出水足迹,污染足迹等新的足迹项目,克服基本模型中计算项目的偏颇性;与其他指标相结合,综合评价可持续发展状况。

1.1 均衡因子

在基本模型中^[5-6],均衡因子基于联合国粮农组织开发的AEZ模型中采用的适宜性指数。该指数代表不同土地类型在现有社会经济条件下的进行农业生产的适应能力,在此基础上的均衡因子着眼于土地的潜在农业生产力而非现实产量,忽视其多功能性,特别是未能体现林地,草地等的生态重要性。Venetoulis等所提出的基于NPP的均衡因子在一定程度上解决了上述问题^[12],反映了不同生态系统在自然或人为干扰条件下的

现实生物量,更体现了它们在满足食物生产和原料供给之外的生态价值,如:气候调节,水土涵养,生物多样性保护,养分循环,废物吸收等。

1.2 产量因子

产量因子主要通过比较同类生物生产性土地的本地平均产量与全球平均产量而得到。这种方法以当前实际产量来计算产量因子,忽略了不同耕种方式对环境影响的差异,比如精细农业相对于粗放农业,可能在某段时期内获得更高的产量,但这需要投入更多的化肥,农药,除草剂等损害耕地未来生产力的物质。因此,Móznér 等建议在计算产量因子时排除因化肥等带来的边际生产力^[13],以可持续产量作为农业开发强度的指导,减少对生态环境系统的不利影响。

另一方面,采用世界平均产量的产量因子虽然便于国际间比较,却无法反映区域生态承载力的真实情况和变化。有人主张用国家公顷^[14],省公顷^[15-16],本地公顷^[17]代替全球公顷,通过产量因子本地化来更好地反映国家、省内不同区域生态环境压力现状。还有学者提出“实际土地需求”^[18-19],不再利用均衡因子和产量因子转为全球公顷,而是直接计算区域内各类土地的实际需求和供应情况。

此外,在时序生态足迹研究中,由于本地单位产量和全球单位产量均存在年度波动,很难厘清这两种变动对产量因子的具体贡献,可能导致某些“生态足迹幻觉”,如因世界平均产量下降而相对地增加本地生态承载力,难以正确评价生态足迹和生态承载力的趋势。Ewing 等在计算国家生态足迹时提出时际产量因子的概念,以多年平均产量得到固定的产量因子^[5],从而更清楚的解释了生态足迹和生态承载力的时序变化,反映了其长期发展状况。

以生物资源的产量来推导产量因子还存在计算项目繁多,作物品种选择缺乏规范的问题,影响了计算结果的科学性。同时,这种方法不太适合林地、草地、水域这些土地类型,例如某些地区限制林木开采,这时根据原本产量所得产量因子,难以反映自然生长情况,也导致计算出的林地生态承载力偏小。Ewing 等建议采用 NPP 方法来计算草地、水域产量因子^[5]。刘某承等则基于 NPP 法计算了中国各类土地的产量因子^[20],修正后的产量因子使生态足迹的计算结果更真实的反映人类消费对生态系统供给能力的占用。

1.3 能源生态足迹项目

1.3.1 化石能源足迹

目前化石能源用地计算主要采用吸碳法,该方法依据 CO₂等温室气体导致的全球变暖已成为人类面临的最大环境威胁,以化石能源燃烧排放的 CO₂除以全球森林的平均吸碳速率得到化石能源足迹。根据 IPCC 的数据,全球森林单位面积的碳吸收量为 1.42tC hm⁻² a⁻¹^[21]。而谢鸿宇等基于陆地生态系统碳循环,计算出全球平均森林吸碳速率为 3.80tC hm⁻² a⁻¹^[22]。从中可以看出,基于不同研究得到的吸碳速率有很大的差异,降低了吸碳法的可靠性。

此外,传统的吸碳法来计算化石能源足迹还存在如下不足:首先,它只考虑了森林对 CO₂的吸收。实际上,其他的土地类型如草地、水体等也具有一定的吸碳能力,如果以各类生物生产性土地的平均吸碳速率计算生态足迹应该更符合实际情况。其次,不同成长阶段不同气候条件下的生态系统,其吸碳能力有很大差异。如当林地步入成熟期时,其 CO₂的吸收率会下降,因此在时间序列研究时应注意参数调整,同时需要处理全球变暖与生物圈固碳能力的复杂关系。再次,CO₂的排放也不仅仅来自化石燃料燃烧。研究发现,土地利用变化所产生的 CO₂约等于 30%的化石燃料排放^[23],反刍类牲畜排放的废气也是 CO₂的重要来源,占全球温室气体总排放量的 18%^[24]。显然,将全球生物圈的碳吸收量全部分配给化石能源燃烧是不合适的。第四,吸碳法所计算的生态足迹实际上是吸收废气所需土地面积,这与其他生态足迹项目计算资源消耗所需生产性土地的逻辑是不一致的。前者允许资源存量的消耗不被补充,而仅消除资源消耗所排放废物对环境的不利影响(主要是温室气体),属于弱可持续观点;后者则希望维持资源存量,其消费速率不超出生产速率,属于强可持续观点,这种不一致削弱了生态足迹的应用价值。最后,对于温室气体,吸碳法只计算了 CO₂,其他如 CH₄、N₂O、HFCs 等则没有考虑。IPCC 的报告指出,这些气体对全球变暖的贡献率达到 25%以上^[23]。利用各种温室气

体的全球增温潜势(GWP)可将它们都纳入生态足迹中^[25],将这些气体的排放量转为对应辐射的CO₂排放量。另外,Walsh等提出应当分析温室气体生命周期以及生物降解途径,如CH₄如何转化为CO₂,土壤、灌木对CH₄的吸收等^[26],但目前人们对其他温室气体的物理化学过程和生物吸收机制仍所知甚少。

在新的国家生态足迹框架中,一些吸碳法的改进已采纳,例如:在全球生态足迹中加入了全球土地覆盖变化所产生的CO₂;调整海洋吸收CO₂的速率,更改后的速率更为稳定;将油气逸出,水泥生产,森林火灾,生物燃料等更多的CO₂来源纳入到足迹账户中^[5-6],这些改进一定程度上改善了吸碳法的不足。

1.3.2 非化石能源足迹

最初的生态足迹账户并不包括核能,Wackernagel等后来在完善国家生态足迹框架时将其作为可选项纳入进来^[2],采用替代法思路,计算同等能值的化石燃料排放CO₂所需的土地面积作为核能足迹。有学者认为,替代法不能反映真实的土地需求,主张以成分法研究核能足迹,分析在核电生产过程中所消耗的各种资源的足迹^[27],例如:基础设施所需的木材,工厂占据的建筑空间,吸收CO₂的林地,乃至因污染丧失生产力的土地等。Stoeglehner等则考虑到核泄漏的风险,根据核事故的历史记录和发生概率,量化在核能生产的铀矿开采,核燃料运输,工厂运作,废料处理等环节中有可能受影响的土地面积^[28]。基于风险分析的核能足迹往往比采用替代法核算的足迹有显著增高,两者的对比,有利于人们对核能利用的短期环境影响和未来风险进行综合评估。

另外,可更新能源生态足迹的研究也取得一定进展。通常将水电的生态足迹归于水电站蓄水发电所淹没的土地面积,其他可更新能源如风电、光电等也采用类似方法^[29],以电站基础设施占用的土地面积来计算生态足迹。

1.4 其他生态足迹项目

1.4.1 耕地

耕地足迹研究主要问题是如何衡量耕地的生态透支。对林地、草地、水域等土地类型来说,生物收割量有可能小于生物生产量,形成生物资源积累;同时收割量也可能大于产量,形成存量透支。耕地则与之不同,耕地上不存在农作物存量,即不可能存量透支。Haberl等主张将现代农业生产中的能源消耗(如农业机械燃料,化肥,农药等)加入耕地足迹^[30];还有学者提出当耕地生产造成养分流失、水质污染、土壤退化等环境影响时即可认为是生态透支^[8],但农耕不一定是这些环境变化的唯一因素,如何量化这些影响、扩展耕地足迹等仍待研究。

1.4.2 水域

通常,以渔产品产量来计算水域足迹。渔业生产有两种方式:养殖和捕获,表面上看,养殖渔业属于密集型生产,单位产量的水域面积远小于捕获方式,但如果将养殖消耗的饲料,能源等足迹并入,总足迹可能有很大的提高。

Talberth等较大程度地修正了渔业足迹方法,将公海面积按人口权重分配到各国,纳入到地球表面所有生产性水域计算,以初级生产力产量代替渔产品原始吨位产量,确定可持续产量的阈值,当实际产量高于阈值时,意味着生态透支^[31]。但这种方法把初级生产作为水产品生长的唯一要素,忽略了鱼类资源存量对其再生产的也同样重要,可行的改善方向是在模型中添加鱼类的存量信息,特别是有关产卵场的信息。

1.4.3 建筑用地

基本模型假设所有的建筑用地都是占用的耕地,计算时直接乘以农作物产量因子和耕地的均衡因子。然而,很多地方的建筑用地是由森林、草地乃至生产力很低的滩涂、荒漠等转化而来的,如果把它们都作为生产力最高的耕地,明显会高估该地的生态承载力。改进的办法是利用遥感影像数据监测土地利用变化,明确建筑用地的具体来源,或者是计算各建筑用地转化前后的净初级生产力,以此确定它的实际足迹和承载力^[12]。还有学者主张将建筑用地从生态足迹账户中取消,理由是耕地转为建设用地后,基本已不再具备生产能力,但总的生态承载力却依然保持不变,这是不合理的^[27]。事实上,基本模型中,建筑用地的生态足迹总是等于其

生态承载力,因为本质上,两者都同指建筑设施已实际占用的生物生产性土地。因此,建筑用地足迹的增加必然使相应的承载力也随之增加,而这会挤占耕地生态承载力,从而增大(缩小)总的生态赤字(盈余)。从这个角度看,建筑用地应当保留在足迹项目中。

1.5 项目扩展

1.5.1 碳足迹与能源足迹

碳足迹(Carbon Footprint)这一源于生态足迹的概念,提出后就很快成为足迹家族中最受关注的焦点。碳足迹可定义为一项活动,一种产品的整个生命活动周期所直接或间接产生的 CO_2 (或 CO_2 当量)排放量^[32]。大部分学者认同碳足迹除 CO_2 外,还应包括其他所有重要的温室气体,这些气体的排放量乘以它们的全球增温潜势(GWP)因子,即得到相应的 CO_2 当量,使各种温室气体的增温效应可以比较和汇总^[33]。

能源足迹与碳足迹非常类似,都用于度量人类活动的温室气体排放,但两者仍存在明显区别。能源足迹是吸收化石燃料,水电,核电等各种能源消耗过程中产生的 CO_2 所需的森林面积,可看作独立出来的生态足迹中能源生态足迹项目;碳足迹则是对碳排放量的表征,以类似于质量单位的千克 CO_2 当量($\text{kg CO}_2\text{e}$)来表示而无须转化为土地面积,其好处在于避免了转化过程因各种假设而带来的不确定性和错误^[34-35]。碳足迹概念清晰,目标明确,计算方法争议相对较少,一些相关的评估规范和标准也已推出,如英国的 PAS 2050 和国际标准化组织的 ISO 14067,这些标准主要基于生命周期评价(LCA)方法,可操作性较强,进一步推动了碳足迹的应用。

1.5.2 水生态足迹与水足迹

基本模型中的水域足迹项目主要是渔业生态足迹,即生产渔产品的水域面积,不能完全反映人类所需的各种产品和服务所消耗的水资源。有研究者对基本模型进行了扩展,提出水生态足迹,意指一定人口所占用的满足其用水消耗的产水面积^[36]。同一水域可能有多种生态系统功能,这与生态足迹的土地功能互斥性假设相违背,张义等提出承认水域功能多样性的事实^[37],将水生态足迹分为水域-渔业、水资源和水环境三类独立账户,从而全面衡量人类活动对水生态系统产生的各种影响。

Hoekstra 等将“虚拟水”理论和生态足迹方法结合起来评价水资源利用,提出水足迹(Water Footprint)概念^[38]。水足迹被定义为:特定人群生产或消耗产品和服务时所需的用水量(主要指淡水)^[39],包括可直接利用的地面水和地下水(蓝水足迹);源于降水,存于土壤,被植被蒸散的水(绿水足迹);废水排放(灰水足迹)。可见水足迹是指生产产品中包含的“虚拟水”^[40]。与生态足迹不同的是,水足迹的衡量标准是用水量(m^3)。同时,水足迹采用均等权重,基于本地生产力计算,表达的是真实的需水量,比较全面的包纳了用水类型,揭示了人类的消费活动对水资源的全球占用,有利于扩展水资源管理的范围和深度。水足迹评价也具有局限性,如:可利用绿水资源量难以估算;灰水足迹的估算主观性强,仅体现了水污染的综合严重程度,缺少具体污染物的分析;数据收集困难;以及缺少对计算过程中的不确定性进行分析。

1.5.3 污染足迹

现有的生态足迹框架主要考虑生物生产性土地所能吸纳的污染部分(如温室气体 CO_2),忽略了其他污染物质的作用,不能完全反映人类活动与自然环境的关系。因此,有必要扩展基本模型,设置污染足迹,以更全面的反映各类污染物的排放及其环境影响。

污染足迹的研究还比较少,已提出的主要方法有:以排污净化或废弃物处理过程中所需的设施占地和能源用地等作为污染足迹^[41],如 Herva 等分析了热等离子技术处理危险废弃物过程中的足迹组成,包括电能消耗的能源足迹,废物熔融、气化后尾气排放中的碳足迹,需扣除的因废渣回收而节省的足迹等^[42];计算垃圾堆放或填埋所占据的耕地足迹或建筑用地足迹;将污染足迹定义为吸纳污染物质所需的土地面积,其吸纳过程包括生物的、物理的、化学的降解和转化(如森林对 SO_2 的吸附,土壤污染的地球化学过程等)^[43];核算因污染所造成的生物生产力损失,以减少的生态承载力间接推导污染足迹^[44]。尽管这些方法还不成熟,但指出了研究方向及可借鉴的思路,有助于最终将污染足迹纳入到生态足迹评估中。

目前污染物的足迹研究相对比较成熟的是氮足迹(Nitrogen Footprint)^[45-46],它主要针对 NO_x 、 N_2O 、 NO_3^- 和 NH_3 等活性氮的污染,这些氮素可在水体、大气和陆地间循环并引发一系列环境问题。氮足迹分析可以帮助人们了解生活中的氮循环情况,改变消费方式,减少氮排放,但仍需进一步明确氮足迹中进入大气和水体的机理和规模,各自对环境影响效应,以及全球氮足迹模型的建立。

1.5.4 矿石资源足迹

Nguyen 等以热力学理论为基础,提出了不可更新资源(主要是矿石资源)足迹^[47]。他们引入了炯(exergy)的概念,认为资源的消耗过程同时也是其可利用的潜在功能(炯)的丧失过程。计算矿石资源足迹是将资源的消耗量化为所损失的炯值,然后假设这种损值由生物性土地所吸收的太阳辐射能来弥补,从而转化为生物性生产土地面积。这种方法从能量转化和流转角度探索了将矿石资源的消耗合并到已有的生态足迹中,增强了生态足迹作为资源利用评价工具的全面性。但这种转换,违背了这类资源的不可再生的本质特性,转换过程比较牵强。未来,从资源循环利用的角度出发,建立类似于水足迹的以消耗量为计量的独立的矿石资源足迹,应当是解决问题的方向。

2 生态足迹研究方法改进

根据消费数据解析的过程,传统生态足迹研究形成了两种基本方法体系:综合法和组分法。前者着眼于初级产品,自上而下的利用整体数据,后者着眼于终端消费项目和个人消费行为的组分划分,自下而上的汇总数据。

综合法在计算全球和国家生态足迹时被大量采用,如世界自然基金会等机构每隔两年发布的《地球生命力报告》即使用此方法。综合法要求有完整可靠的产品生产和贸易数据,使得综合法很难直接应用于地方、城市、企业或个人的生态足迹计算。

组分法由 Simmons 等提出^[48],组分法能获取某种消费品或消费行为的生态足迹信息^[49],克服了综合法的所面临的数据获取和贸易调整难点。组分法存在的问题:一是它的计算准确度依赖于组分划分的彻底性和生命周期分析的可靠性。二是即使同一种消费品,在不同生产过程中所需的自然资源、能源及排放的废物的结构和数量有可能存在很大差异。

2.1 基于生命周期评价的生态足迹方法

生命周期评价是一种广泛使用的用于评价特定产品或服务从获取原材料、生产、使用直至最终处置的整个生命过程的环境影响的工具^[50],通常包括4个阶段:目标与范围的确定,清单分析,影响评价和结果解释。LCA 能较全面的跟踪产品全过程,其计算过程详细,有相关的国际标准(ISO 14040)和规范文件供参考,比较适合产品或服务的生态足迹研究。

LCA 法的主要缺陷是边界确定和数据选择比较复杂,有时存在一定的主观成分,因此,应用 LCA 法进行生态足迹计算应注意以下几点:所采用的方法和数据应符合 ISO14040 和 14044 标准^[51];初级产品的生态足迹核算应尽量使用国家生态足迹中相关的产量因子;应评估影响结果精度的问题,如截面误差和重复计算。

2.2 基于投入产出分析的生态足迹方法

环境的投入产出分析(IOA)是由 Leontief 提出的包括货币与实物流动,资源输入和环境污染输出等信息的分析方法。1998 年, Bicknell 等研究新西兰生态足迹时,将投入产出分析法引入生态足迹的计算(EF-IO)^[52]。此后,相关研究大量开展起来,并在方法上有所更新,较新的进展如: Turner 等^[53]结合多区域投入产出表(MRIO),研究了国际贸易间的资源和污染分配;Wiedmann 等^[54]提出投入产出分析和国家生态足迹帐户(NFA)相结合;Kratena 等^[55]基于投入产出模型计算消除生态赤字所需的成本;Galli^[56], Ewing^[57], Zhao^[58]等人尝试了将投入产出分析应用在碳足迹,水足迹的研究中。

EF-IO 已在国家、区域、社会经济组织、公司等生态足迹中广泛应用,特别是在因缺少贸易数据而难于使用综合法的研究场景中。EF-IO 所依据的环境经济投入产出表编制方法成熟规范,是国民经济核算体系的常

规部分,数据充分可靠,能够全面提供明确、一致的从生产到消费的足迹账户,能反映不同的产业部门、消费类别、区域、组织间的生态足迹需求及流动,增强了生态足迹模型的结构性和可比性。基于 MRIO 的 EF-IO 能进一步分析国际商品贸易中隐含的资源、能源和污染足迹的流向,确定来自不同国家、不同部门的进口足迹的产量因子,追踪某种产品或服务国际供应链的环境影响,为制定国际环境政策提供依据。编制与联合国环境经济综合核算框架准则一致的 MRIO,有利于提高足迹计算的可比性和准确性,是国家生态足迹评价标准化的理想选择。EF-IO 方法也存在一些不足,从资源利用和环境影响来看,实物投入产出表比货币投入产出表更适合生态足迹计算,但面临如重复计算、废物处理、数据获取等难点;因数据分辨率问题,在微观尺度^[9],如计算个人、具体产品的生态足迹时,不能直接应用 EF-IO,需要寻找与其他方法的结合,如与 LCA 法相结合,融合二者的长处弥补其缺陷。

2.3 基于净初级生产力的生态足迹方法

净初级生产力是指绿色植物在太阳能光合作用下生物物质的年生产量,是地球上所有消费者和分解者生存、生长、繁殖的基础。Venetoulis 等提出了基于净初级生产力的生态足迹计算方法(EF-NPP)^[12]。相对于传统 EF 计算方法,该方法有较大变化:在生态承载力计算中包含了所有的水面和陆地,认为低生产力土地和海洋对生态系统服务也起着重要作用;承认土地功能的多样性;改变碳吸收的土地类型和速率;基于 NPP 重设均衡因子;保留更多的生物多样性保护用地。

以上改进弥补了传统 EF 方法的某些缺陷,如土地功能互斥假设,均衡因子失真,忽略生态功能等,更清楚的揭示人类活动与生态系统服务的关系。其内含的净初级生产力的人类占用(HANPP)从生态系统动力学视角更深入的了解生物生产和消费链,反映了区域间贸易的生物量交流。在技术上,利用遥感和地理信息系统(GIS)可快速获取实时 NPP 信息。但其计算方法和模型尚不完善和规范;NPP 获取精度欠佳;基于 NPP 的均衡因子不稳定等缺点也有待解决。同时,明确可持续的 NPP 消耗以及利用 HANPP 与生物多样性的内在联系,探索生态足迹中增加生物多样性的评价方法^[9],也是 EF-NPP 的研究潜力。

2.4 基于能值的生态足迹方法

能值的概念是由 Odum 提出用以评估自然资产和生态系统功能的工具。生态足迹的能值分析就是以能值为基准,把生态经济系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一标准的能值来衡量和分析。

Zhao 等^[59]最先把能值分析引入到生态足迹中,利用能值转换率,计算区域各消费项目的人均太阳能值,再转化为能值足迹。其他一些改进的研究如:Chen 等^[60]基于全球能值密度来计算生态承载力和足迹,使两者可以比较;Liu 等^[61]在年度全球能值总量中纳入了表层土壤能值;Siche 等^[62]在足迹计算中考虑了土壤流失和水资源消耗因素,并保留了 14.2%的生物多样性保护用地;Pereira 等^[63]以各生态群落的能值而不是平均值来计算林地生态承载力。

与传统 EF 模型所采用的均衡因子、产量因子等争议较大的等量化参数相比,基于能值的 EF 方法所采用的能值转换率、能值密度等参数更加稳定,更具实际意义。能值转换率还反映了一定的经济发展状况和技术水平。但是,能值密度的测量比较困难,精度较低,没有统一的规范;不同产品或过程的能值到足迹的转换具有不同的特性,分析复杂;能值足迹是基于能量流分析的,不能反映生物物质的投入产出与流转情况,也缺少判明资源利用可持续性的指标,因此,应当与基于生物生产的生态足迹相互补充从不同侧面评价生态系统功能。

2.5 基于三维模型的生态足迹方法

传统生态足迹模型是基于生物生产性土地面积的二维模型,无法区分自然资本利息和存量的关系,也未体现生态透支在时间维度上的积累和不可持续状况。Niccolucci 等^[64-65]提出把基于面积的二维模型发展为具有体积的三维时空模型,以表征自然资源的过度利用。该模型有两个维度:足迹面积(EF_{size})和足迹深度(EF_{depth})。足迹面积是指在区域生态承载力限度内,实际所占用的生物生产性土地的面积;足迹深度则是为维持自然资产的消耗所需的生态承载力面积的倍数,又可以区分为自然深度和附加深度。自然深度取值为

1,代表生态系统的年度自然资本利息,但如果自然资本利息不能满足消耗需求,需要生态透支存量资源时,就额外产生了附加深度。方恺等运用上述原理方法,对中国生态足迹的深度和广度进行了研究^[66-67],并提出了改进指标,如:人均历史累积足迹广度、足迹广度基尼系数和理论足迹广度。

三维生态足迹模型在保持生态足迹基本框架和计算结果不变的基础上,丰富其内涵,增加了新的足迹深度维度,更加明确地衡量和跟踪自然资本存量的消耗程度。深度的积累和变化反映了资源消费与生态服务的代内和代际分配,同时,公众和企业也能更直观地认识他们的行为可能造成的环境影响。作为新提出的方法,该模型还有很多需要完善的地方,如:在区域尺度,区间贸易的存在使生态透支难以识别,从而基于生态透支来计算足迹深度变得困难;模型中生态足迹被视为圆柱体,但体积仍以全球公顷这样的面积单位来度量,缺少明确的物理意义;指出了资源枯竭的速度,但未能明确其对生物承载力和生态环境的具体影响,缺少存量资源总量分析,无法估算存量枯竭的阈值。

2.6 基于时间序列的动态生态足迹方法

传统生态足迹模型是一个静态指标,它得出的结论都是瞬时性的。近年来生态足迹研究试图通过计算各指标的时间序列值来追踪各个时点的自然、社会、经济变化,以弥补指标静态性的缺陷,如《地球生命力报告》中对 1961 年以来全球生态足迹的变化分析^[68]。长时序研究中需要解决的重要问题是产量因子是否需要建立在当地潜在的生产力基础上,生产力因子可能比产量因子更容易解释生态足迹和生物生产力在长时间序列上的变化原因。

时序研究的重要目的是进行趋势模拟和预测。例如 Vuuren 等^[69]利用 IMAGE 2.2 模型进行因子模拟。也有研究者直接根据生态足迹序列值,尝试引入非线性的预测模型,如综合自回归移动平均模型^[70-71]、集对分析^[72]、灰色预测模型^[73]、动力趋势模型^[74]、经验模态分解 EMD 方法^[75-76]等。还有研究通过分析生态足迹与其驱动因素的定量关系,建立动态模型,进行生态足迹预测。主要采用的方法包括多元线性回归、偏最小二乘回归、递阶偏最小二乘回归^[77]、库兹涅茨曲线分析^[78]、环境压力随机模型^[79]、人工神经网络^[80-81]等。另外,有学者采用了基于土地利用和土地覆盖变化的生态足迹预测方法,如 Wood^[82]、Chang 等^[83]进行的相关研究。上述方法处理了生态环境系统的变化复杂性,给出了具有指导意义的对生态系统总体趋势的预测,但缺少在生态系统结构上进行模拟和仿真,很少涉及生态承载力的变化。

长远来看,人类活动的影响如土地利用与土地覆盖变化、气候变暖会危害生态系统功能,进而损害人们所能获取的生态服务。因此,理想的生态足迹动态模拟应当包括影响人类活动与生物生产力关系的所有自然、经济、政策、技术因素,以结构解析的方式来建模。Lenzen 等提出的动态生态足迹(DEF)模型沿此方向做了有益的尝试^[84],基于人类消费活动,生产活动,土地利用,温室气体排放,生物多样性,生物生产力等的相互影响和趋势进行了国家生态足迹的时序分析。

3 展望

生态足迹自提出以来已经得到了广泛的应用和不断的完善。但是,生态足迹模型和方法仍处于不断发展的阶段,综合国内外学者研究,未来生态足迹方法研究的重点如下:

(1) 生态足迹核算方法的标准化研究

生态足迹已越来越多的应用于人类活动对自然资源(主要是生物资源)消耗的可持续性的评价。在此背景下,加强生态足迹标准的研究,确保计算方法、过程和结果的透明性、一致性、可靠性和可比性,变得十分重要。标准化能鼓励更广泛、更规范采用生态足迹,提高其促进可持续发展的效率和影响力。生态足迹标准的内容应包括:源数据采集、计算过程、关键参数、边界确定、结果评价等方面。标准的制定需要政府机构,国际组织,学术团体等的共同参与,近年来,全球足迹网络(GFN)已做了大量的相关工作,也推出了一些指导性标准,但除国家生态足迹较完善外,地方层面和产品的生态足迹核算还缺少统一的、详细的约定,需要进一步的推进。

(2) 生态足迹评价的不确定性和敏感性分析

生态足迹评价中存在着广泛的不确定性,影响了研究结果的可信度。不确定性来源于多个方面:1)数据质量的不确定,如数据收集过程所传递的误差,数据缺乏,数据代表性不足,对数据选取不当。2)关键参数的不确定。如基于 AEZ 模型的平衡因子所涉及的土壤、气温、坡度、降水等各种因素的量度,产量因子中草地、水域 NPP 的估算,全球平均 CO₂吸收速率的设定,畜牧业单位产品食物消耗的计算等。都有可能因缺少资料信息,而只能简化、粗估或代替,也可能引入错误的知识和方法,或者计算中的误差,从而产生不确定性。3)因模型固有缺陷引起的不确定性,如没有考虑不同类型土地功能的多样性和相互影响,对地球碳循环复杂机理的简化,地区间贸易平衡的错综与难以跟踪等。因此,识别生态足迹评价中不确定性的产生路径和敏感性因素,提高核算结果的可靠性和公信力,为环境管理者或决策者提供相对准确的信息是非常必要的。未来,从数据的可信度、时间、来源、地理覆盖面、技术水平等方面来进行数据质量评估,应用 OAT、蒙特卡洛法、拉丁超立方取样等方法进行不确定性定量与敏感性分析,是生态足迹研究的重要方向。

(3) 构建全面的生态足迹指标体系

现有的生态足迹模型指标存在种种缺陷,没能完整描述自然系统的生态功能,忽略了不可更新资源、水资源的作用,对污染物的生态环境影响没有完全考虑。虽然一些学者提出了改进方法,但大多数建议仍不成熟,缺乏有效性验证。因此,希望依靠生态足迹单一指标来描绘人类所面临的环境和可持续发展问题显然是不现实的,建立能够全面衡量人类活动对自然资源需求及环境压力的指标体系,以多个不同侧面,相互补充的指标来代替单一指标成为必然选择。相对于其他资源环境指标,生态足迹的优势是计算方法易操作,计算结果可比和简明易懂。目前,借鉴生态足迹思想的碳足迹,水足迹已广为接受,分别成为评估温室气体排放和水资源利用的有力工具,相同思路的能源足迹,氮足迹,磷足迹,污染足迹,生物多样性足迹等^[85]也已提出但还不成熟。未来,需要对这些足迹指标和方法的进一步完善,以及提出更多类似的指标,如:荒漠足迹,湿地足迹,气溶胶足迹,臭氧足迹,重金属足迹,硫足迹等,乃至社会经济足迹,如:食物足迹,工作机会足迹,教育足迹,健康足迹,人权足迹,产业足迹,投资足迹等,使足迹家族不断发展壮大。更为挑战的是,对这些指标进行代表性筛选,纳入统一的研究框架,采用标准的研究方法,如 LCA 法和 IO 分析法,构建全面涵盖可持续发展的评价体系。

(4) 基于生态透支界限的动态生态足迹研究

2009 年, Rockström 领导的研究小组,提出了 9 种对人类生存至关重要的地球生命支持系统的过程,并确定了这些过程的生物物理安全值,称之为行星界限(Planetary boundaries)^[86]。这些界限如果被突破,地球系统不能以稳定的状态运行,会给人类造成无法承受的环境变化。行星边界的提出,为动态生态足迹的研究提供了新的启示。根据生态足迹理论,在全球范围内,如果人类的资源消耗超出同期(通常为年)地球所能更新的生物生产力,即生态足迹高于生态承载力时,意味着自然资本存量的消耗和污染物质的累积,显然,这种生态赤字状况是不可持续的。但是,不可持续的临界点在哪里,生态透支是否存在一个类似行星界限的阈值,超出后会导致生态系统的突变,生态功能和生物生产力发生不可逆转的退化,现有的生态足迹方法很少关注这一问题。实际上,生态足迹直接涉及 Rockström 等提出的关键性地球过程中的两项:土地利用变化和气候变化,它们的行星界限指标分别是用于耕种的非冻土比例和大气中 CO₂ 浓度。因此,是否可利用这两个指标来确定全球生态透支界限,或者是否通过生态透支对食物生产,水土流失,生物多样性减少,气候变化等产生不可恢复影响作为界限,以及通过预测资源和能源消费的发展趋势与生态承载力的变化,判断是否达到生态透支界限与时点,乃至如何将生态透支界限应用于局部区域中,都是值得探讨而又十分复杂的问题。

(5) 多学科多方法交叉融合,引入新的方法技术手段

生态足迹研究涉及资源、环境与社会经济等领域,应当集合生态学,资源学,地理学,经济学,数学等多学科的学者进行交叉研究,充分吸收各学科的最新研究成果,发展基础理论方法,要重视现有方法如: LCA, IOA, 能值分析, 动态模型等的融合使用,例如: LCA 与 IOA 方法结合,既能较好的覆盖全过程,又能减少截断误差

和重合,还能简化计算项目;能值分析与 NPP 方法结合,发挥能值参数稳定的优势,也可利用 NPP 反映不同土地类型的能值生物生产力差异。此外,还要不断更新研究手段,如建立生态足迹和生态承载力变化的监测网络,建设全球共享的资源环境数据库,引入各种非线性研究模型,利用 RS-GIS 等快速实时获取和评价资源利用情况等,以推动生态足迹研究的进一步深入和发展。

参考文献 (References):

- [1] Wackernagel M, Rees W E, Testemale P. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island: New Society Publisher, 1996.
- [2] Wackernagel M, Schulz N B, Deumling D, Linares A C, Jenkins M, Kapos V, Monfreda C, Loh J, Myers N, Norgaard R, Randers J. Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2002, 99(14): 9266-9271.
- [3] Galli A, Kitzes J, Wermer P, Wackernagel M, Niccolucci V, Tiezzi E. An exploration of the mathematics behind the ecological footprint. *International Journal of Ecodynamics*, 2007, 2(4): 250-257.
- [4] Ewing B, Moore D, Goldfinger S. Ecological Footprint Atlas 2010. USA Oakland: Global Footprint Network, 2010.
- [5] Ewing B, Reed A, Galli A, Kitzes J, Wackernagel M. Calculation Methodology for the National Footprint Accounts, 2010 Edition. USA Oakland: Global Footprint Network, 2010.
- [6] Borucke M, Moore D, Cranston G, Gracey K, Iha K, Larson J, Lazarus E, Morales J C, Wackernagel M, Galli A. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: the national footprint accounts underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 518-533.
- [7] 李明月. 生态足迹分析模型假设条件的缺陷浅析. *中国人口: 资源与环境*, 2005, 15(2): 129-131.
- [8] Bastianoni S, Niccolucci V, Pulselli R M, Marchettini N. Indicator and indicandum: "sustainable way" vs "prevailing conditions" in the ecological footprint. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 47-50.
- [9] Wiedmann T, Barrett J. A review of the ecological footprint indicator—perceptions and methods. *Sustainability*, 2010, 2(6): 1645-1693.
- [10] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. *中国人口: 资源与环境*, 2006, 16(6): 69-78.
- [11] 向书坚, 柴士改. 生态足迹若干不足、修正与完善以及应用拓展. *资源科学*, 2013, 35(5): 1051-1058.
- [12] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441-469.
- [13] Mózner Z, Tabi A, Csutora M. Modifying the yield factor based on more efficient use of fertilizer—the environmental impacts of intensive and extensive agricultural practices. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 58-66.
- [14] 顾晓薇, 王青, 刘建兴, 李广军. 基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法. *东北大学学报: 自然科学版*, 2005, 26(4): 397-400.
- [15] 冯娟, 赵全升, 谢文霞, 安乐生. “省公顷”在小城镇生态足迹分析中的应用研究——以山东省晏城镇生态建设为例. *地理科学*, 2008, 28(2): 209-213.
- [16] 张恒义, 刘卫东, 林育欣, 单娜娜, 王世忠. 基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析. *生态学报*, 2009, 29(5): 2738-2748.
- [17] Kissinger M. Approaches for calculating a nation's food ecological footprint—the case of Canada. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 366-374.
- [18] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 2001, 37(2): 229-255.
- [19] Lenzen M, Hansson C B, Bond S. On the bioproductivity and land-disturbance metrics of the Ecological Footprint. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 6-10.
- [20] 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. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592-597.
- [21] IPCC. Inter-annual and decadal variability of atmospheric CO₂ concentrations. http://www.grida.no/climate/ipcc/land_use/020.htm#table1-2. 2008.
- [22] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 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.
- [23] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [2013-10-22]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>.
- [24] FAO. Livestock's Long Shadow-Environmental Issues and Options. [2013-10-23]. <http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.htm>.
- [25] Holden E, Høyer K G. The ecological footprints of fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2005, 10(5): 395-403.
- [26] Walsh C, O'Regan B, Moles R. Incorporating methane into ecological footprint analysis: a case study of Ireland. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1952-1962.
- [27] Kitzes J, Galli A, Bagliani M, Barrett J, Dige G, Ede S, Erb K, Giljum S, Haberl H, Hails C, Jolia-Ferrier L, Jungwirth S, Lenzen M, Lewis K, Loh J, Marchettini N, Messinger H, Milne K, Moles R, Monfreda C, Moran D, Nakano K, Pyhälä A, Rees W, Simmons C, Wackernagel M, Wada Y, Walsh C, Wiedmann T. A research agenda for improving national ecological footprint accounts. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1991-2007.
- [28] Stoeglehner G, Levy J K, Neugebauer G C. Improving the ecological footprint of nuclear energy: a risk-based lifecycle assessment approach for critical infrastructure systems. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2005, 1(4): 394-403.
- [29] Abellera D. Energy footprints. [2013-10-28]. http://rprogress.org/training_manual/Footprints_And_Energy_Brief.pdf.
- [30] Haberl H. Interdisciplinary perspectives on soil protection in a sustainability context: Using the material and energy flow (MEFA) approach in

- studying land use. *Die Bodenkultur*, 2006, 57(1/4): 203-214.
- [31] Talberth J, Venetoulis J. Recasting the Marine Ecological Footprint. [2013-10-28]. <http://www.rprogress.Org/publications/2006/Fishprint%20Technical%20Supplement.pdf>.
- [32] Weidema B P, Throne M, Christensen P, Schmid J, Løkke S. Carbon footprint-a catalyst for life cycle assessment?. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(1): 3-6.
- [33] Hanafiah M M, Huijbregts M A J, Hendriks A J. The influence of nutrients and non-CO₂ greenhouse gas emissions on the ecological footprint of products. *Sustainability*, 2010, 2(4): 963-979.
- [34] Cranston G R, Hammond G P. Carbon footprints in a bipolar, climate-constrained world. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 91-99.
- [35] Čuček L, Klemeš J J, Kravanja Z. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 34: 9-20.
- [36] Luck M A, Jenerette G D, Wu J G, Grimm N B. The urban funnel model and the spatially heterogeneous ecological footprint. *Ecosystems*, 2001, 4(8): 782-796.
- [37] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析. *生态学报*, 2013, 33(13): 4111-4124.
- [38] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London: Earthscan Ltd., 2011: 1-4.
- [39] Jeswani H K, Azapagic A. Water footprint: methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(12): 1288-1299.
- [40] Vanham D, Bidoglio G. A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 2013, 26: 61-75.
- [41] Tian M R, Gao J X, Zheng Z R, Yang Z P. The Study on the ecological footprint of rural solid waste disposal-example in Yuhong District of Shenyang. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 16: 95-101.
- [42] Herva M, Hernando R, Carrasco E F, Roca E. Development of a methodology to assess the footprint of wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 180(1-3): 264-273.
- [43] Jiao W J, Min Q W, Cheng S K, Li W H. The Waste absorption footprint (WAF): A methodological note on footprint calculations. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 356-360.
- [44] 白钰, 曾辉, 魏建兵, 张文娟, 赵宏伟. 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. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1989-1996.
- [45] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, Erisman J W, Kohn R, Kitzes J. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environmental Development*, 2012, 1(1): 40-46.
- [46] Andrews M, Lea P J. Our nitrogen "footprint": The need for increased crop nitrogen use efficiency. *Annals of Applied Biology*, 2013, 163(2): 165-169.
- [47] Nguyen H X, Yamamoto R. Modification of ecological footprint evaluation method to include non-renewable resource consumption using thermodynamic approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 51(4): 870-884.
- [48] Simmons C, Lewis K, Barrett J. Two feet — two approaches: a component-based model of ecological footprinting. *Ecological Economics*, 2000, 32(3): 375-380.
- [49] Moore J, Kissinger M, Rees W E. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124(6): 51-61.
- [50] De Alvareng R A F, Da Silva Júnior V P, Soares S R. Comparison of the ecological footprint and a life cycle impact assessment method for a case study on Brazilian broiler feed production. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 28: 25-32.
- [51] Kitzes J, Ewing B, Wermer P. *Ecological Footprint Standards 2009*. [2013-10-23]. http://www.Footprintnet-work.org/en/index.php/GFN/page/application_standards/.
- [52] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, Bigsby H R. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 1998, 27(2): 149-160.
- [53] Turner K, Lenzen M, Wiedmann T, Barrett J. Examining the global environmental impact of regional consumption activities — Part 1: A technical note on combining input-output and ecological footprint analysis. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 37-44.
- [54] Wiedmann T, Minx J, Barrett J, Wackernagel M. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis. *Ecological Economics*, 2006, 56(1): 28-48.
- [55] Kratena K. From ecological footprint to ecological rent: an economic indicator for resource constraints. *Ecological Economics*, 2008, 64(3): 507-516.
- [56] Galli A, Weinzettel J, Cranston G, Ercein E. A footprint family extended MRIO model to support Europe's transition to a One Planet Economy. *Science of the Total Environment*, 2013, 461-462: 813-818.
- [57] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, Galli A, Ercein A E, Weinzettel J, Steen-Olsen K. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 1-8.
- [58] Zhao X, Chen B, Yang Z F. National water footprint in an input-output framework-a case study of China 2002. *Ecological Modelling*, 2009, 220(2): 245-253.

- [59] Zhao S, Li Z Z, Li W D. A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [60] Chen B, Chen G Q. Modified ecological footprint accounting and analysis based on embodied exergy—a case study of the Chinese society 1981-2001. *Ecological Economics*, 2007, 61(2-3): 355-376.
- [61] Liu Q P, Lin Z S, Feng N H, Liu Y M. A modified model of ecological footprint accounting and its application to cropland in Jiangsu, China. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 154-162.
- [62] Siche R, Pereira L, Agostinho F, Ortega E. Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study. *Communications in Nonlinear Science Numerical Simulation*, 2010, 15(10): 3182-3192.
- [63] Pereira L, Ortega E. A modified footprint method: The case study of Brazil. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 113-127.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 方恺, Heijungs R. 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.
- [67] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标. *生态学报*, 2013, 33(1): 267-274.
- [68] WWF, ZSL, GFN. Living Planet Report 2012. [2013-10-24] http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/2012_lpr/.
- [69] van Vuuren D P, Bouwman L F. Exploring past and future changes in the ecological footprint for world regions. *Ecological Economics*, 2005, 52(1): 43-62.
- [70] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 匡耀求. 城市水生态足迹变化分析与模拟. *资源科学*, 2006, 28(5): 152-156.
- [71] Jia J S, Zhao J Z, Deng H B, Duan J. Ecological footprint simulation and prediction by ARIMA model—A case study in Henan Province of China. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 538-544.
- [72] 周敬宣, 李湘梅, 陈雷, 李勇. 基于集对分析的城市生态足迹预测——以武汉市为例. *资源科学*, 2007, 29(3): 111-116.
- [73] 张乐勤, 李荣富, 荣慧芳, 许信旺. 安徽省近 10 年能源足迹测度及驱动因子分析. *环境科学研究*, 2012, 25(4): 474-480.
- [74] 陈成忠, 林振山. 中国生态足迹和生物承载力构成比例变化分析. *地理学报*, 2009, 64(12): 1523-1533.
- [75] 张衍广, 原艳梅. 基于经验模态分解的中国生态足迹与生态承载力动力学预测. *资源科学*, 2008, 30(8): 1212-1217.
- [76] 陈成忠, 林振山. 中国能源足迹增长波动的驱动因子分析. *生态学报*, 2009, 29(2): 758-767.
- [77] 贾俊松. 河南生态足迹驱动因素的 Hi_PLS 分析及其发展对策. *生态学报*, 2011, 31(8): 2188-2195.
- [78] Bagliani M, Bravob G, Dalmazzone S. A consumption-based approach to environmental Kuznets curves using the ecological footprint indicator. *Ecological Economics*, 2008, 65(3): 650-661.
- [79] Jia J S, Deng H B, Duan J, Zhao J Z. Analysis of the major drivers of the ecological footprint using the STIRPAT model and the PLS method — A case study in Henan Province, China. *Ecological Economics*, 2009, 68(11): 2818-2824.
- [80] Li X M, Xiao R B, Yuan S H, Chen J A, Zhou J X. Urban total ecological footprint forecasting by using radial basis function neural network: A case study of Wuhan city, China. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 241-248.
- [81] Mostafa M M, Natarajan R. A neuro-computational intelligence analysis of the ecological footprint of nations. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2009, 53(9): 3516-3531.
- [82] Wood R, Lenzen M. An application of a modified ecological footprint method and structural path analysis in a comparative Institutional Study. *Local Environment*, 2003, 8(4): 365-386.
- [83] Chang B, Xiong L Y. Ecological footprint analysis based on RS and GIS in arid land. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 44-52.
- [84] Lenzen M, Wiedmann T, Foran B, Dey C, Widmer-Cooper A, Williams M, Ohlemüller R. Forecasting the Ecological Footprint of Nations: A Blueprint for a Dynamic Approach, Stockholm Environment Institute [D]. York, UK: University of York, 2007.
- [85] Galli A, Wiedmann T, Erce E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100-112.
- [86] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, de Wit C A, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K., Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461(7263): 472-475.