

DOI: 10.5846/stxb201305211128

方恺.足迹家族:概念、类型、理论框架与整合模式.生态学报, 2015, 35(6):1647-1659.

Fang K. Footprint family: concept, classification, theoretical framework and integrated pattern. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6):1647-1659.

足迹家族:概念、类型、理论框架与整合模式

方 恺*

荷兰莱顿大学环境科学系, 莱顿 2333CC

摘要: 足迹研究是当前生态经济学和可持续发展领域的热点与前沿课题。探讨了足迹类指标的内涵, 将其定义为一类评估人类资源消费和废弃物排放等活动环境影响的指标; 介绍了生态足迹、碳足迹、水足迹、能源足迹、化学足迹、氮足迹和生物多样性足迹 7 类典型足迹指标的概念与研究进展; 在此基础上提出了普适性的足迹家族概念, 总结了足迹家族的选择性、开放性、系统性和不确定性特征, 并根据足迹类指标的一般运算流程构建了足迹家族的理论框架; 基于大量文献成果系统比较了生态足迹、碳足迹和水足迹 3 类关键足迹的特征差异, 提出了在足迹家族层面增强指标兼容性的措施; 通过逐一测试各关键足迹与 27 项环境问题的相关程度, 从决策相关性的角度初步探索了该足迹家族的整合模式; 展望了未来足迹(家族)研究的重点方向。

关键词: 足迹家族; 生态足迹; 碳足迹; 水足迹; 整合; 决策相关性

Footprint family: concept, classification, theoretical framework and integrated pattern

FANG Kai*

Institute of Environmental Sciences (CML), Leiden University, Leiden 2333CC, Netherlands

Abstract: Footprints are one of the topics and frontiers which have gained tremendous popularity in sustainability science and ecological economics. The year of 2012 marked the 20th anniversary since the concept of ecological footprint was introduced to the global community for the first time. A suite of indicators analogous to the ecological footprint has been developed, which could serve as the basis for approaching an integrated family of footprint indicators. Our paper started from the idea of providing clarity on the common ground behind different footprints, where footprints are defined as a suite of indicators that measure the environmental impacts associated with resources consumed and waste discharged. A relatively comprehensive description of the concepts and research progresses was given for seven typical footprint indicators, namely the ecological footprint, the carbon footprint, the water footprint, the energy footprint, the chemical footprint, the nitrogen footprint, and the biodiversity footprint. Conceived in simple terms, footprint family is a form of indicator systems integrated by certain footprint indicators, in which the impacts of human activities in terms of resource consumption and waste emissions on the environment are to be estimated. The principal features of footprint family exist in its selective, open, systematic, and uncertain attributions. This paper made an attempt at establishing a theoretical framework for the generalized footprint family where it allowed for tracking the calculating process of footprint-style indicators in a common way. Based on a review of a large amount of original literature on footprint methodologies and applications over the past two decades, we evaluated the pros and cons of each of three key footprints, namely the ecological, carbon and water footprints, in a comparative sense by listing their characteristics in terms of conceptual origins, research questions, supporting methods, metric units, indicator components and policy relevance from the perspective of footprint family. Potential solutions were

基金项目: 国家公派留学基金项目(20113005)

收稿日期: 2013-05-21; 网络出版日期: 2014-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fang@cml.leidenuniv.nl

proposed to enhance the transparency, consistency and compatibility among the ecological, carbon and water footprints within the footprint family. In a policy context, the integrated pattern of the footprint family was explored on the policy relevance of the three footprints at a preliminary stage. More specifically, by testing each of the footprint indicators in correlation to twenty-seven environmental issues, the footprint family has been found able to offer policy makers a more complete picture of human pressure on the planet's environment. The remainder of this paper proposed some priorities for further improvement to develop more rigorous and scientific footprint studies. Depending on the diversity and complexity of environmental issues, the ongoing development of the footprint family should proceed with the recognition that the combination of footprint indicators is a systematic project that requires multidisciplinary perspectives and approaches as complementary. To that end, we argue for extensive communication and collaboration between communities of a variety of footprint indicators. Even though the footprint family concept suffers from limitations, we still believe that in the near future it will play an important role in guiding individuals towards more responsible behaviors, and in providing useful suggestions for environmental decision-making.

Key Words: footprint family; ecological footprint; carbon footprint; water footprint; integration; policy relevance

现代工业文明带给人类物质极大丰富的同时,产生的资源环境问题正日益成为制约社会发展的“短板”。以往局部性、单一性的环境问题逐渐向全球性、复合性转变,生态破坏、能源污染、气候变暖和水资源短缺等事件在大尺度范围内频发,严重威胁着自然生态系统的功能与稳定。截至 2010 年,人类的资源占用和废弃物排放强度已经超出地球自身可承载能力约 50%^[1-2];预计到 2050 年时,至少需要 2.6 个地球才能持续支撑全球人口的资源消费量^[3]。在如此严峻的背景下,人类对自身行为及其与自然界关系的反思也在不断深化。其中一个标志性事件是可持续发展理论的提出:自 1987 年《我们共同的未来》发表以来^[4],可持续发展作为新的发展理念与模式已逐渐成为世界各国的共识^[5]。

对人类活动现状的客观评估是实现可持续发展的第一步。足迹正是这样一类评估指标,其概念最早源自生态足迹分析法^[6-7]。该方法以简便、直观的优点,为定量评估自然资源的利用状况提供了新的途径,被生态经济学界誉为可持续发展量化领域最重要的成果之一^[8-10]。在生态足迹创立至今的 20 年间,能源足迹^[11]、碳足迹^[12]、水足迹^[13]、化学足迹^[14]、氮足迹^[15]、生物多样性足迹^[16]等一系列新的足迹类型被相继提出,大大丰富了足迹概念的内涵和外延,同时也为开展不同足迹类型间的整合研究奠定了基础。但总的来说,足迹家族研究还处于起步阶段,鲜有系统论述其基本理论框架的文献报道,而国内在该领域的研究更几近空白。有鉴于此,本文首先明确足迹的定义并介绍几种典型的足迹类型,在此基础上阐述足迹家族的基本概念、特征和理论框架,然后在该框架下对生态足迹、碳足迹和水足迹 3 类最常用指标进行系统比较,最后从决策相关性的角度初步探索其整合模式。

1 足迹的定义与类型

1.1 定义

在研究足迹家族之前,首先有必要对足迹类指标的基本概念有一个较为全面的理解。广义上的足迹包含理论、方法、模型、指标、术语、数据等不同层次,但本文主要从指标层面进行研究。围绕足迹指标定义的争论始终存在,综合相关文献,大体上可分为 4 类:①足迹是以面积为计量单位的空间性指标^[17];②足迹是表征资源消费水平的指标^[18-19];③足迹是表征人类活动的环境影响的指标^[15,20-22];④足迹只是某些指标的一种称谓,并不具有明确的定义^[23]。

定义①单纯沿用生态足迹的标准,将碳足迹、水足迹等大部分新兴足迹类型排除在足迹范畴之外,显然具有片面性;定义④虽然承认存在不同足迹类型,但没有揭示其内在联系,只看作一种称谓,也是有失偏颇的。鉴于目前已有的足迹指标类型还主要局限在环境领域,所涉及的环境影响来源一般包括资源消费(如生态足

迹、绿水和蓝水足迹)和废弃物排放(如碳足迹、氮足迹、硫足迹、灰水足迹)两大类,将②与③相结合的定义较为合理;足迹是一类评估人类资源消费和废弃物排放等活动的环境影响的指标。同时也应看到,足迹类指标的发展是一个渐进的动态过程,随着新指标(如社会足迹、经济足迹^[23])不断地出现,人们对足迹内涵与外延的认识也将进一步深化和丰富。

1.2 主要类型

足迹类指标一般按环境影响类型进行划分,包括生态足迹、碳足迹、水足迹、能源足迹、化学足迹、氮足迹和生物多样性足迹等;但也可按研究尺度划分,如产品足迹、个人足迹、家庭足迹、部门足迹、区域足迹、国家足迹、全球足迹等;还有少数按研究方法或模型划分,如能值足迹^[24]、放射能足迹^[25]、三维足迹^[26]等。下面以较为常见的影响类型为划分原则,从概念缘起、研究进展及改进方向等方面简要介绍 7 种较为重要的足迹类型。

1.2.1 生态足迹

生态足迹是足迹家族最早的成员,自 Rees^[6]于 1992 年首次提出已有逾 20 年的历史。其概念源于对人类承载力定义^[27]的倒置,旨在定量测度特定人口的资源消费需求。基本思路是将某一区域的消费资源和排放废弃物的环境影响,量化为这些活动所需要占用的耕地、草地、林地、水域、建设地、碳吸收地 6 类生物生产性土地面积。根据全球足迹网络(GFN)的最新解释^[28],生态足迹被定义为:在现有技术和资源管理水平下,人类活动对生物圈需求的度量;对应的生物承载力被定义为:为人类提供生态系统服务消费的生物生产性土地和海洋面积的度量。经典的生态足迹模型已被成功应用于大中尺度的实证研究^[7,29,30],并逐渐发展成较为规范的方法学体系:国家足迹核算(NFA)^[28,31]。与此同时,以投入产出分析(IOA)、生命周期评价(LCA)、新千年生态系统服务评估(MEA)、净初级生产力(NPP)、土地利用/覆被变化(LUCC)、能值分析、放射能分析、情景分析、非线性科学理论、生态补偿等方法或技术为支撑的改进成果的发表,进一步推动了生态足迹方法学的发展与完善^[32]。尽管争论与质疑一直存在^[8,18,33-37],但生态足迹仍是最受学界、政府和公众推崇的环境指标之一^[9],其联合创始人 Rees 和 Wackernagel 也在 2012 年共同获得了环境保护领域的殊荣——蓝色星球奖^[38]。

1.2.2 碳足迹

随着公众对全球气候变暖关注度的提高,碳足迹正日益成为足迹研究领域的新热点。虽然碳足迹的命名受到生态足迹思想的影响,但其实质是以全球暖化潜势^[39]为基础进行 CO₂与其他温室气体(如 CH₄、N₂O、CF₄)之间的碳当量转换。尽管缺乏统一、明确的定义^[40],但通过综合 Wiedmann 等^[12]和 BSI^[41]的研究,可以将其定义为:人类活动过程中直接和间接的温室气体排放量。LCA 是应用最广的碳足迹分析方法,尤其适用于产品、部门等中小尺度的研究^[42-43],其优势在于破除“有烟囱才有污染”的观念^[44],变末端静态评估为生命周期动态评估,真正实现“从摇篮到坟墓”的过程全覆盖。此外,IOA、混合方法也是碳足迹重要的计算方法^[45-46],还有各种网络版本的碳足迹计算器。尽管碳足迹已成为十分普及的碳排放指标,但其理论框架和核算方法仍有待进一步完善。有研究认为碳足迹应从质量单位向面积单位转换,以弥补自身环境信息不足的缺陷,更好地为制定气候政策的提供依据^[40,47-48]。但也有学者认为这样势必会增加评估结果的不确定性和误差,因为一些温室效应显著的有机污染物(如氟氯烃)很难被生物圈自然吸收,难以将其排放量折算成相应的土地吸收面积^[21,49-50]。

1.2.3 水足迹

水足迹是近些年来又一颇受关注的足迹类指标,自下而上的 LCA 和自上而下的 IOA 都是常见的计算方法^[13,1,20,50]。创立者 Hoekstra 等^[13]将其定义为:一定区域内所有产品和服务所需要消费的累计虚拟水含量。虚拟水的概念最早由 Allan^[51]提出,初衷是为了引导缺水国家和地区通过水资源密集型的农产品贸易来减少水赤字^[52]。水足迹对这一概念进行了拓展,并派生出若干相关的子概念,包括蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹等^[53-54]。水足迹与生态足迹分别对应水资源消费和生物资源消费,二者无论在指标性能还是在研究方法上都有有一些可比之处^[43,55-56],①全球可比性:水足迹<生态足迹,因为水足迹基于本地生产力因子进行计算,而

生态足迹则是基于全球海洋平均生产力因子进行计算;②地理定位性:水足迹>生态足迹,因为全球大部分的水资源消费都以虚拟水的形式进行,水足迹不仅计算水资源消费的数量,还要追踪其来源;③侧重点不同:水足迹关注的是人类活动对水量的需求(体积单位),而生态足迹账户下的渔业足迹则关注水产品消费对水域面积的占用(面积单位),并不存在账户重叠。

1.2.4 能源足迹

能源足迹(又称碳吸收地足迹)是由生态足迹直接衍生出来的概念,旨在量化人类能源碳排放的环境影响。Wackernagel 等^[7]最初将其定义为:在全球林地平均碳吸收速率下,消纳化石燃料消费和电力生产所排放 CO₂ 需要占用的林地面积。后来由于考虑到海洋的碳吸收贡献而在计算中扣除了约 30% 的碳排放量^[28,57],并调整了核电部分的计算方法^[31]。尽管如此,能源足迹仍是生态足迹账户中最具争议的部分^[58]:①碳排放端核算仅基于终端能源消费数据,未考虑其他环节的碳排放;②碳吸收端核算仅基于林地抽样调查数据,无法真实反映全球生态系统的平均碳吸收水平^[31,58-59];③能源足迹对应的碳吸收地具有虚拟性质,与生态足迹账户中的其他 5 类生物生产性土地存在本质区别^[60];④缺乏相应的承载力计算方法^[61],从而导致奇高的区域生态赤字贡献率^[62]。因此,不少学者尝试将能源足迹从生态足迹账户中剥离出来单独加以研究^[11,58,63-66]。围绕能源足迹目前还有一些问题亟待解决:①如何将 CO₂ 外的其他能源废弃物也纳入核算;②如何确定不同能源类型(如化石燃料、核电、水电)的累加权重;③如何准确测算碳吸收速率这一关键因子;④如何有效区别于碳足迹。

1.2.5 化学足迹

化学足迹的概念最早见于大气环境领域研究,被用于测度城市大气化学成分的不成比例程度^[67-68]。直至 Panko 等^[14]才利用化学足迹评估消费者或生产者的化学制品使用情况及环境特征,并从产品尺度给出了相对完善的定义:产品由于其化学成分而对人类和生态可能造成的潜在风险危害。化学足迹的研究范围取决于所定义的系统边界,最广可延伸至整个生命周期,从而为全面评估产品和服务的可持续性与社会责任提供依据^[69]。有学者建议基于共识驱动模型计算化学足迹,以保证化学排放可以完整地纳入 LCA 框架^[70]。当前化学足迹研究的局限性主要在于参数选取的不确定和暴露风险评估的缺乏,从而阻碍了消费者根据评估结果客观判断不同产品的优劣^[69]。迄今为止,国内未见以化学足迹为主题的研究报道,与国外先进水平差距明显。

1.2.6 氮足迹

氮足迹是为了定量评价人类活动对活性氮排放的影响而提出的。Leach 等^[15]将其定义为:个人食物和能源消费所造成的活性氮的环境损失;秦树平等^[71]的定义则更显合理:某种产品或服务在其生产、运输、储存以及消费过程中直接和间接排放的活性氮(如 NO_x、N₂O、NO₃⁻、NH₃)总和。尽管基于 LCA 的氮足迹计算器可以计算从个人到全球各尺度的氮足迹^[72],但其应用范围仍远远不及具有类似思路的碳足迹,主要制约因素包括概念不清、系统边界模糊、数据可得性欠佳等^[15,23]。因此,与碳足迹的比较研究可以作为氮足迹未来发展的优先方向^[23]。此外,与之类似的硫足迹也尚处于研究起步阶段^[73-74]。

1.2.7 生物多样性足迹

生物多样性足迹的概念最早由 Smith 等^[16]提出,旨在测度由 LUCC、自然资源开采及外来物种入侵等过程引发的生物多样性损失,通常采用受胁迫物种数量表征^[75],也有的用受影响的土地面积或生物形态来表征^[23,76]。在为数不多的实证研究中,最具代表性的成果当属 Lenzen 等^[77]基于一个高性能的跨区域投入产出(MRIO)数据库,分析了国际贸易对发展中国家生物多样性的损害,发现高收入国家在对外出口中往往具有相对较小的生物多样性足迹输出,这得益于高收入国家掌握较为先进的清洁生产技术或已经实现了集约型产业的转移^[75]。与化学足迹一样,生物多样性足迹研究在国内也尚属空白领域。

2 足迹家族的基本概念、特征与理论框架

2.1 概念与特征

足迹家族一词最早见于 Giljum 等^[78],旨在发挥其他足迹类型对生态足迹的补充作用。值得一提的是,中国学者吴燕^[79]率先对生态足迹、碳足迹和水足迹进行了实证研究,基于改进的模型测算了北京市居民日用品中的这 3 类足迹。此后,Hoekstra^[55]、Curry 等^[80]、Page 等^[81]、Hammond 等^[40]、Xue 等^[82]分别详细比较了生态足迹与水足迹、生态足迹与碳足迹、碳足迹与水足迹、碳足迹与能源足迹、碳足迹与氮足迹之间的异同;Čuček 等^[23]系统回顾了不同足迹的定义、计量单位及应用实例;Lenzen 等^[83]采用 MRIO 模型,分析了全球 187 个国家超过 15 000 个工业部门的生态足迹、碳足迹和水足迹;Steen-Olsen 等^[20]利用相似的模型比较了欧盟 27 国的生态足迹、碳足迹和水足迹,并计算了各成员国之间的足迹净转移;Galli 等^[21,84]首次明确地将足迹家族定义为:含有生态足迹、碳足迹和水足迹的指标集合,用于评估人类的生物资源和水资源消费及温室气体排放行为对地球环境系统的影响;Fang 等^[43,50]将不同足迹之间的相互作用关系归纳为 3 类:互补、重叠、拮抗,并全面评估了由生态足迹、能源足迹、碳足迹和水足迹组成的足迹家族的性能;Ridoutt 等^[85]建议以 LCA 为方法学基础开展足迹家族标准化研究。

综合相关研究,本文将足迹家族的概念定义为:足迹家族是由若干足迹类型整合而成的指标系统,用于评估资源消费和废弃物排放等人类活动的环境影响。其主要特征如下:

(1) 选择性 足迹家族通常由 2 种及以上足迹类指标组成,足迹类型的选择视具体研究需要而定。已有研究的足迹组合形式主要有:生态足迹与碳足迹^[80];生态足迹与水足迹^[55];碳足迹与能源足迹^[40];生态足迹、碳足迹、水足迹与氮足迹^[23]等。

(2) 开放性 理论上,所有足迹类型都可以纳入足迹家族的研究范畴。不过,目前一些足迹类型由于缺乏明确的概念和方法支撑,在实际操作中似还不足以纳入足迹家族研究。

(3) 系统性 足迹家族的功能在于对若干特定足迹类型进行系统研究,为多角度、多层次评估人类活动的综合环境影响提供科学依据。不同足迹具有共性是足迹家族得以建立的必要条件,而保持各类足迹的特性则是足迹家族相对于单一足迹的优势所在。

(4) 不确定性 由于不同足迹要求的数据来源和精度不同,同一足迹在不同尺度的分析方法也有很大差异,从而导致不同足迹之间可能不兼容,加之组合形式的多样化,最终的评估结果存在一些不确定性。

事实上,正如家庭成员存在角色分工一样,各类足迹指标在足迹家族中的地位和影响也有显著差异。在此提出典型足迹、关键足迹、衍生足迹和新兴足迹 4 种概念:

(1) 典型足迹 指具有较为清晰的理论缘起、较为明确的研究方法、较为广泛的应用范围的足迹类型。上面介绍的生态足迹、碳足迹、水足迹、能源足迹、化学足迹、氮足迹和生物多样性足迹均应属于典型足迹范畴。

(2) 关键足迹 指具有显著环境影响、且为人类生存所必需的活动所产生的足迹类型。包括生态足迹、碳足迹和水足迹,分别对应人类的生物资源、矿物能源和水资源 3 类关键自然资本^[86]消费(严格来说,生态足迹还对应化石燃料、碳足迹还对应其他有机物、水足迹还对应水体污染物)。

(3) 衍生足迹 由某类足迹直接衍生出来的、在研究内容或研究方法上存在高度相似性的足迹类型。如能源足迹是生态足迹的衍生足迹,氮足迹、磷足迹和硫足迹均是碳足迹和化学足迹的衍生足迹。

(4) 新兴足迹 已被文献提出、但尚缺乏较为明确的理论和方法支撑的足迹类型。如材料足迹^[75]、NPP 的人类占用足迹^[75]、土地足迹^[87]等。

2.2 理论框架

从足迹类指标的一般运算流程出发,可以将足迹家族的理论框架分为 3 部分:输入端、处理系统、输出端。其中,输入端负责原始数据的输入;输出端负责评估结果的输出;处理系统是保证足迹家族发挥作用的核心部

分,又可分为3个子系统:环境影响子系统、分析方法子系统、足迹指标子系统(图1)。下面简要介绍处理系统下的各子系统。

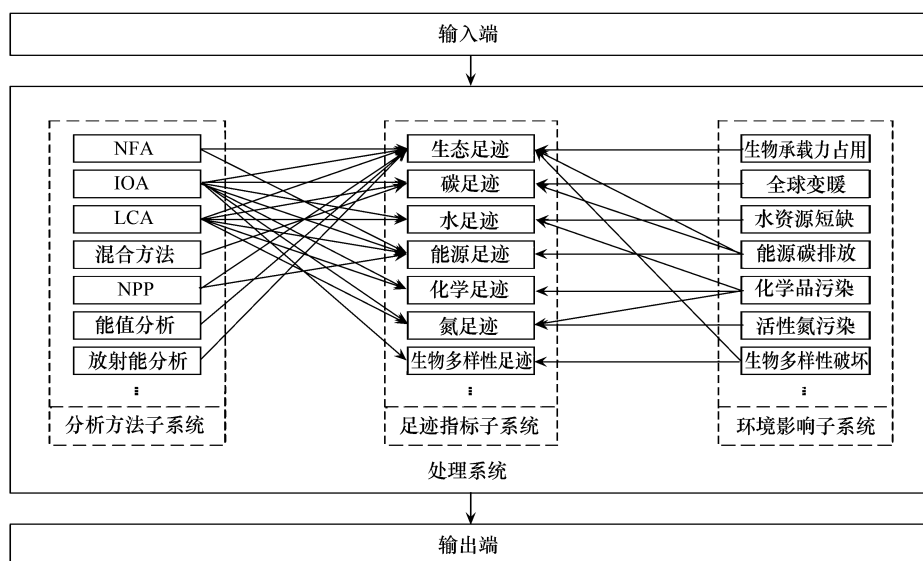


图1 足迹家族的理论框架

Fig.1 The theoretical framework for the generalized footprint family

(1) 环境影响子系统

所涉及的人类活动大体可分为2类:①资源消费,如生态足迹以占用土地的大小来反映生物资源和化石燃料消费的环境影响^[7],水足迹以水资源消费量来反映产品或服务的环境影响^[13],生物多样性足迹以受胁迫物种的数量变化来反映特定产品消费的环境影响^[75];②废弃物排放,如碳足迹、氮足迹和硫足迹分别以含碳、氮和硫气体的排放量来反映产品或服务的环境影响^[12,15,74]。

(2) 分析方法子系统

足迹类指标的量化方法主要包括:①NFA,适用性最广的生态足迹经典方法,GFN 利用其定期评估全球各国的生态足迹,并对计算方法进行修正^[28,31];②IOA,近年来应用日趋广泛,由其衍生的 MRIO 模型更成为足迹家族研究的重要技术手段^[20,75,84];③LCA,普遍运用于产品和部门尺度的各类足迹特别是碳足迹研究^[42,83];④混合方法,兼具 LCA 和 IOA 的优势,对中小尺度的碳足迹计算十分有效^[46,88];⑤能值分析,现已成为生态足迹计算的一项重要方法^[24,89];⑥放射能分析,尤其适用于测算贸易过程中的隐性生态足迹^[25];⑦NPP,应用于生态足迹和能源足迹的模型改进^[58-59],被认为是有望重构生物生产力计算的潜在方法^[90];⑧MEA,结合生态足迹以刻画 LUCC 下的自然资本供需变化^[91]。

(3) 足迹指标子系统

足迹类指标的特性主要由其环境影响类型与分析方法共同决定,下文将通过实证分析加以说明,此不赘述。此外,分析发现多数足迹类指标在本质上还具有一定的共性,主要表现为:①转化考量。多数环境影响难以直接表征,因而足迹类指标大多通过生物物理当量的转化而达到量化环境影响的目的,如碳足迹将产品的温室效应,通过全球暖化潜势转化为碳质量当量;②商除计算。简而言之,足迹=代表某类环境影响的指标总量÷该类指标的单位强度,如生态足迹将人类消费的生物资源量除以单位面积的生物产量,得到相应的土地面积当量;③虚拟性质。正是由于前面两点因素,足迹计算结果往往具有一些虚拟性,不同于通过实测得到的物理量。需要指出的是,有学者据此认为生态足迹错误、无效^[33],其实是对足迹类指标功能的误解。事实上,类似的虚拟化处理方式在 GDP 等很多指标中也广泛存在^[92]。

3 足迹家族的整合模式:以生态足迹、碳足迹和水足迹为例

生态整合有利于促进生态学研究从单尺度、描述性向多尺度、前瞻性、机理性和信息化的智能集成转变^[93]。为探索足迹类指标的整合模式,下面以生态足迹、碳足迹和水足迹 3 类关键足迹组成的特定足迹家族为例,从决策相关性^[21,33]的角度进行初步的实证分析。根据 Web of Science 的检索结果,生态足迹、碳足迹和水足迹是最受学者关注的足迹指标类型。1992—2012 年,以“生态足迹”、“碳足迹”和“水足迹”为关键词的文献出现频次分别高达 598、839、172 篇,其中过去 5 a 更是分别增长了 1 倍、12 倍、9 倍,无论是载文量还是绝对增量均远远超过其他足迹类型。表 1 系统比较了 3 类关键足迹在概念缘起、研究问题、分析方法、计量单位等方面的特征及优势和劣势。

可见,这 3 类关键足迹在诸多方面存在明显差异,主要表现为:①理论基础不一致,生态足迹、碳足迹和水足迹分别缘起于承载力、全球暖化潜势和虚拟水,而且三者的假设前提也有所不同;②分析方法不统一,各类足迹指标均未形成有权威公信力的计算标准规范,几种常用方法之间也很难具有可比性;③核算账户有重叠,主要是碳足迹与生态足迹在碳排放方面存在重复计算;④测度结果不可比,3 类足迹分别采用面积、质量和体积单位,从而导致结果间不具有可比性和加和性;⑤政策指向有差异,最明显的例子是,生态足迹通过对比生物承载力可以量化生态赤字,但碳足迹则没有此功能。

表 1 生态足迹、碳足迹和水足迹的特征比较
Table 1 Comparison of characteristics of the ecological, carbon and water footprints

项目 Item	生态足迹 Ecological footprint	碳足迹 Carbon footprint	水足迹 Water footprint
概念缘起 Conceptual root	承载力	全球暖化潜势	虚拟水
研究问题 Research question	由生物资源消费和废弃物排放引起的生物生产性土地占用量	由产品或活动引起的碳排放量	由产品或活动引起的水资源消费量
分析方法 Analysis approaches	NFA、IOA、LCA、NPP、MEA、能值分析、放射能分析	IOA、LCA、混合方法	IOA、LCA
计量单位 Measurement units	面积(hm ² 、m ² 等)	质量(CO ₂ -eq kg、t 等)	体积(m ³ 、L 等)
指标构成 Indicator components	耕地足迹、草地足迹、林地足迹、渔业足迹、建设地足迹、碳吸收地足迹	CO ₂ 碳足迹、CH ₄ 碳足迹、N ₂ O 碳足迹	蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹
政策指向 Policy relevance	结合生物承载力测度生态超载状况,从消费者责任的角度判断人类活动的可持续性	从碳排放的角度测度产品或活动对温室效应的贡献程度	从追溯来源的角度测度水资源的跨区依赖程度及分布状况
优势 Strengths	普及性、全球可比性、易于理解和计算、指标复合性、与生物承载力对应、部分标准化	普及性、涵盖全面、易于理解、部分标准化	涵盖全面、地理定位性、指标复合性
劣势 Weaknesses	假设欠妥、可重复性弱、生态偏向性	概念模糊、数据可得性弱、计算复杂、环境信息缺失	计算复杂、数据可得性弱、环境信息缺失、缺乏规范化

资料部分源于文献[43,50]

三类足迹在各方面的差异最终都将影响到其实际的决策支持能力。因此,本文尝试通过测试生态足迹、碳足迹、水足迹在重要环境领域的决策相关程度来评估该足迹家族的指标整合潜力。考虑到环境问题本身的复杂性和不确定性,对环境指标的政策效用评估应遵循全面性、多样化的原则^[94]。为此,本文广泛选取了环境领域的 27 项热点问题进行评估(图 2)。这些环境问题均与国计民生息息相关,部分源自欧盟委员会关于自然资源消费及其环境影响评估的若干战略项目报告^[21],当然其中一些问题不可避免地存在交叉。

如图 2 所示,三类关键足迹指标及其足迹家族在所涉及环境问题的范围及对政府决策的影响程度上存在一定差异:①生态足迹主要集中在自然资源管理和公共政策领域;②碳足迹主要集中在气候变化和大气污染控制领域;③水足迹主要集中在水资源管理和水污染监测领域;④足迹家族整合了三类关键足迹指标的决策

相关性,可以为评估温室气体排放、气候变化两个领域的环境问题提供充分信息,为水污染、水资源利用和生产力两个领域的环境问题提供较为充分的信息;为生物多样性保护、可持续消费、清洁生产、自然资源开发和管理、环境健康与人类生存、资源利用的不均衡分布、固体废弃物管理、大气污染 8 个领域提供部分信息;为化学毒物排放、不可再生资源保护、城乡环境规划、环境公平、栖息地监测、公共农业政策、公共渔业政策 7 个领域间接提供少量信息。

可见,较之单一的足迹指标,由生态足迹、碳足迹和水足迹整合而成的足迹家族具有如下优势:①广泛性。涉及上述 27 项环境问题的大部分(70%);②互补性。从不同角度评估某一生态系统所受的人类压力,如对本水域生态系统而言,既可利用水足迹分析其水资源消费情况,又可利用生态足迹分析其渔业资源消费情况;③综合性。涵盖生物圈(生态足迹)、大气圈(碳足迹)、水圈(水足迹),有助于揭示三大圈层要素在陆地表层界面的相互作用机制,深化对地人系统结构与功能复杂关系的认识。

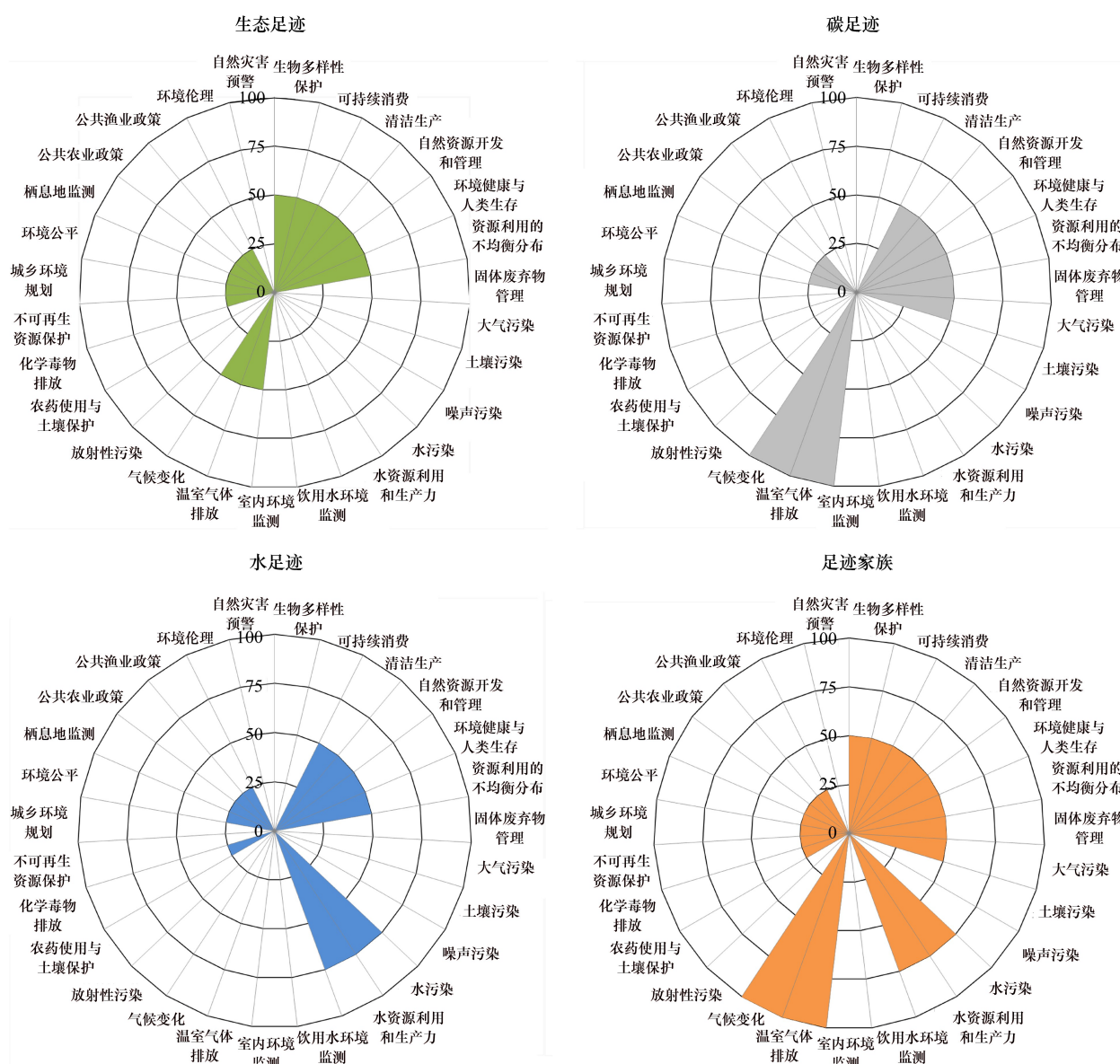


图2 生态足迹、碳足迹、水足迹及其足迹家族的决策适用范围与强度评估

Fig.2 The width and depth of the policy usefulness for each of the footprints and their footprint family

指标选取和数值评估部分参见文献[21];5种扇形面积分别表示足迹类指标与环境问题的决策相关程度,由高到低依次为:100(完全相关)、75(高度相关)、50(部分相关)、25(微弱相关)、0(完全不相关);需要强调的是,即便某类足迹指标与特定环境问题之间相关度为100,也不意味着仅用该指标就能充分反映此环境问题的全部信息。

4 研究展望

足迹研究是当前生态经济学和可持续发展量化领域的热点与前沿课题。如果分别以最具代表性的 3 类关键足迹(生态足迹、水足迹、碳足迹)和足迹家族概念的正式创立为标志,可将过去 20 年足迹研究的发展历程划分为 4 个阶段(图 3)。研究重点逐步从单尺度、描述性的足迹类型研究向多尺度、集成化的足迹整合研究转变。在肯定长足进步的同时,还应看到仍有大量尚待解决的问题,特别是足迹家族研究尚处于起步阶段,本文提出的仅是初步的理论框架,远未形成一套完备的基础理论、指标体系、评价原则和方法规范。未来应从如下几个方面进一步改进和完善足迹(家族)研究。

(1) 对生态足迹、碳足迹和水足迹三类关键足迹的

实证研究表明,现阶段可采取如下措施增强三者在足迹家族框架内的兼容性:①设定明确的系统边界(如工厂、城市、国家),以统一足迹家族的研究范围;②采用经过验证的模型计算 3 类足迹,以保证分析方法的一致性;③将碳吸收地足迹从生态足迹账户中移除,以避免与碳足迹重复计算;④对计算结果可以分类讨论,但在取得共识前不建议盲目进行加权;⑤承认足迹家族的决策支持局限性,即目前只能评估人类活动对生物圈、大气圈和水圈的某些环境影响,但还缺乏对应的行星边界阈值^[95]来共同判断这些活动的可持续性强弱。

(2) 建立足迹类指标信息库,通过文献查新等手段,及时收集各类足迹在基本概念、研究方法、实证应用等方面的研究进展。以信息库的大量数据为基础,推动足迹分析方法的标准化、规范化建设^[34]。碳足迹和水足迹在方法标准化方面已取得一些进展,前者有 PAS2050^[41]、ISO14067^[96]等,后者有 ISO14046^[97]等。同时应继续扩大足迹类指标的对比研究,评估不同足迹之间在替代性、互补性、兼容性等方面的特点,为开展量化的足迹家族整合研究提供理论支撑。

(3) 注意将具备整合条件的新兴足迹纳入研究范畴,逐步规范研究思路、完善学科体系,为最终建立足迹科学奠定基础。探索不同组合形式的足迹家族,并注意在科学性、稳定性、连续性、兼容性、尺度转换性等因素之间寻求平衡^[31],以期为足迹科学研究提供范式。此外,与其他指标类型的结合能够更好地为经济和社会维度的可持续发展评价提供依据。目前已有的结合包括:生态足迹与真实储蓄^[98]、GDP^[99]、可持续经济福利指标^[100]、可持续发展指标^[101]、人类发展指数^[102]、恩格尔系数^[103]等;碳足迹与累计能源需求^[104]、人体毒性^[48]等;水足迹与锡尔指数、基尼系数^[105]等。

近年来,国际足迹研究呈现出新的发展趋势:研究热点由单一足迹的模型改进逐渐向多重足迹的方法融合过渡,研究中心也由美国 GFN 逐渐向瑞典、英国、荷兰、意大利等欧洲国家分散转移,国际合作日益广泛而密切。欧盟委员会资助下的“一个星球经济网络(OPEN: EU)”项目,历时 2 年完成了对包括中国在内的 45 个国家或地区 57 个部门的生态足迹、碳足迹和水足迹的测算工作,详细数据可以从在线资料库(<https://www.eureapa.net/>)下载。

参考文献(References):

- [1] Haberl H, Erb K H, Krausmann F, Gaube V, Bondeau A, Plutzar C, Gingrich S, Lucht W, Fischer-Kowalski M. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(31): 12942-12947.
- [2] WWF, ZSL, GFN. Living planet report 2010: biodiversity, biocapacity and development. [2011-10-05]. http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/living_planet_report_timeline/2010_lpr2/.

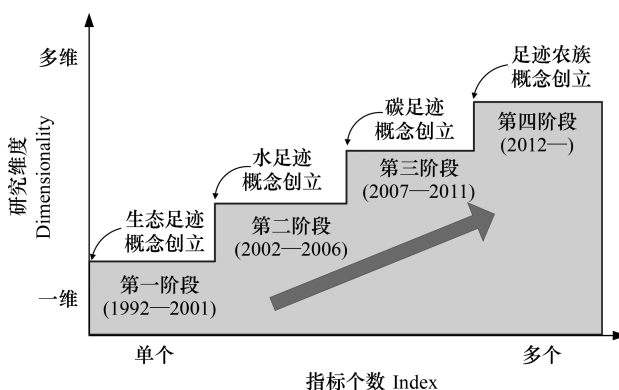


图3 足迹研究的4个发展阶段

Fig.3 Four steps in the development of footprint studies

- [3] Moore D, Cranston G, Reed A, Galli A. Projecting future human demand on the Earth's regenerative capacity. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 3-10.
- [4] WCED. *Our Common Future*. New York: Oxford University Press, 1987.
- [5] 王录仓, 高静. 高寒牧区区域生态足迹——以甘南州合作市为例. *生态学报*, 2012, 32(12): 3795-3805.
- [6] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [7] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [8] 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.
- [9] 张林波, 李文华, 刘孝富, 王维. 承载力理论的起源、发展与展望. *生态学报*, 2009, 29(2): 878-888.
- [10] Dietz T, Rosa E, York R. Environmentally efficient well-being: rethinking sustainability as the relationship between human well-being and environmental impacts. *Human Ecology Review*, 2009, 16(1): 114-123.
- [11] Ferng J J. Toward a scenario analysis framework for energy footprints. *Ecological Economics*, 2002, 40(1): 53-69.
- [12] Wiedmann T, Minx J. A definition of 'carbon footprint'. ISAUK Research Report 07-01, Durham: ISAUK Research & Consulting, 2007.
- [13] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade//Value of Water Research Report Series (No. 11). Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2002.
- [14] Panko J, Hitchcock K. Chemical Footprint Ensuring Product Sustainability. [2012-10-04]. http://chemrisknano.com/~chemrisk/images/stories/Chemical_Footprint_Ensuring_Product_Sustainability.pdf.
- [15] 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): 40-66.
- [16] Smith G, McMasters J, Pendlington D. Agri-biodiversity indicators: a view from unilever sustainable agriculture initiative//Agriculture and biodiversity: developing indicators for policy analysis. Zurich: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2001.
- [17] Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue. *Nature*, 2007, 445(7125): 256-256.
- [18] Vogelsang K M. Footprint: ignoring the facts that don't fit the theory. *Nature*, 2002, 420(6913): 267-267.
- [19] Hoekstra A Y. Water neutral: reducing and offsetting the impacts of water footprints//Value of Water Research Report (Series 28). Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2008.
- [20] Steen-Olsen K, Weinzettel J, Cranston G, Ercin A E, Hertwich E G. Carbon, land, and water footprint accounts for the European Union: Consumption, production, and displacements through international trade. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(20): 10883-10891.
- [21] Galli A, Wiedmann T, Ercin 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.
- [22] UNEP/SETAC. Life cycle management: how business uses it to decrease footprint, create opportunities and make value chains more sustainable. [2011-10-05]. <http://www.unep.fr>.
- [23] 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.
- [24] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [25] 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): 355-376.
- [26] 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.
- [27] Ehrlich P R. Human carrying capacity, extinctions, and nature reserves. *Bioscience*, 1982, 32(5): 331-333.
- [28] 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.
- [29] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares C A, Falfún I S L, García 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.
- [30] Wackernagel M, Lewan L, Hansson C B. Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint. *Ambio*, 1999, 28(7): 604-612.
- [31] 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.

- [32] 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.
- [33] van den Bergh J, Grazi F. On the policy relevance of ecological footprints. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(13): 4843-4844.
- [34] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消耗生态足迹和水足迹. 资源科学, 2011, 33(6): 1145-1152.
- [35] 彭建, 吴健生, 蒋依依, 叶敏婷. 生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷. 生态学报, 2006, 26(8): 2716-2722.
- [36] 陈成忠, 林振山. 生态足迹模型的争论与发展. 生态学报, 2008, 28(12): 6252-6263.
- [37] Fiala F. Measuring sustainability: why the ecological footprint is bad economics and bad environmental science. *Ecological Economics*, 2008, 67(4): 519-525.
- [38] GFN. Ecological footprint work receives international recognition with prestigious Blue Planet Prize. [2012-11-15]. http://www.footprintnetwork.org/de/index.php/blog/af/ecological_footprint_work_receives_international_recognition_with_prestigio.
- [39] Høgevoid N M. A corporate effort towards a sustainable business model: a case study from the Norwegian furniture industry. *European Business Review*, 2011, 23(4): 392-400.
- [40] Cranston G R, Hammond G P. Carbon footprints in a bipolar, climate-constrained world. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 91-99.
- [41] BSI. Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. London: British Standards, 2008.
- [42] de Benedetto L, Klemes J. The environmental performance strategy map: an integrated LCA approach to support the strategic decision making process. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(10): 900-906.
- [43] Fang K, Heijungs R, de Snoo G. The footprint family: comparison and interaction of the ecological, energy, carbon and water footprints. *Revue de Métallurgie*, 2013, 110(1): 79-88.
- [44] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 吝涛. 碳足迹分析方法研究综述. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 71-78.
- [45] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(16): 6414-6420.
- [46] Berners-Lee M, Howard D C, Moss J, Kaivanto K, Scott W A. Greenhouse gas footprinting for small businesses-The use of input-output data. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(5): 883-891.
- [47] Kitzes J, Wackernagel M. Answers to common questions in ecological footprint accounting. *Ecological Indicators* 2009, 9(4): 812-817.
- [48] Laurent A, Olsen S, Hauschild M Z. Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(7): 4100-4108.
- [49] Herva M, García-Díéguez C, Franco-Uría A, Roca E. New insights on ecological footprinting as environmental indicator for production processes. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 84-90.
- [50] Fang K, Heijungs R, de Snoo G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon and water footprints: Overview of a footprint family. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 508-518.
- [51] Allan J A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits. *Groundwater*, 1998, 36(4): 545-546.
- [52] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展. 资源科学, 2006, 28(1): 120-127.
- [53] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water International*, 2008, 33(1): 19-32.
- [54] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价. 自然资源学报, 2011, 26(3): 486-495.
- [55] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [56] Wackernagel M. Methodological advancements in footprint analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1925-1927.
- [57] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 231-246.
- [58] 方恺, 董德明, 林卓, 沈万斌. 基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法. 生态学报, 2012, 32(9): 2900-2909.
- [59] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. *Environment Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441-469.
- [60] 谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞, 肖玉, 章予舒. 中国的生态服务消费与生态债务研究. 自然资源学报, 2010, 25(1): 43-51.
- [61] 徐中民, 程国栋, 邱国玉. 可持续性评价的 ImPACTS 等式. 地理学报, 2005, 60(2): 198-208.
- [62] WWF, ZSL, GFN, ESA. Living planet report 2012: biodiversity, biocapacity and better choices. [2013-01-05]. http://awsassets.panda.org/downloads/lpr_2012_online_full_size_single_pages_final_120516.pdf.
- [63] Stögllehner G. Ecological footprint-a tool for assessing sustainable energy supplies. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11(3): 267-277.
- [64] 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.
- [65] 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.

- [66] Wiedmann T. A first empirical comparison of energy Footprints embodied in trade-MRIO versus PLUM. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1975-1990.
- [67] Guttikunda S K, Tang Y, Carmichael G R, Kurata G, Pan L, Streets D G, Woo J H, Thongboonchoo N, Fried A. Impacts of Asian megacity emissions on regional air quality during spring 2001. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D20): D20301, doi: 10.1029/2004JD004921.
- [68] Butler T M, Lawrence M G. The influence of megacities on global atmospheric chemistry: a modelling study. *Environmental Chemistry*, 2009, 6(3): 219-225.
- [69] Hitchcock K, Panko J, Scott P. Incorporating chemical footprint reporting into social responsibility reporting. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2012, 8(2): 386-388.
- [70] Hauschild M Z, Joliet O, Huijbregts M A J. A bright future for addressing chemical emissions in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(8): 697-700.
- [71] 秦树平, 胡春胜, 张玉铭, 王玉英, 董文旭, 李晓欣. 氮足迹研究进展. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 462-467.
- [72] Nitrogen Footprint Calculator. [2011-01-08]. http://www.n-print.org/sites/n-print.org/files/footprint_java/#/home.
- [73] Wang F, Sims J T, Ma L, Ma W, Dou Z, Zhang F. The phosphorus footprint of China's food chain: implications for food security, natural resource management, and environmental quality. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(4): 1081-1089.
- [74] 张昭利. 中国二氧化硫污染的经济分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [75] Moran D D, Lenzen M, Kanemoto K, Geschke A. Does ecologically unequal exchange occur? *Ecological Economics*, 2013, 89: 177-186.
- [76] Yaap B, Struebig M J, Paoli G, Koh L P. Mitigating the biodiversity impacts of oil palm development. *CAB Reviews*, 2010, 5(19): 1-11.
- [77] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Foran B, Lobefaro L, Geschke A. International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 2012, 486(7401): 109-112.
- [78] Giljum S, Hinterberger F, Lutter S. Measuring natural resource use: context, indicators and EU policy processes. SERI Background Paper 14. Vienna: SERI, 2008.
- [79] 吴燕. 北京市居民生活消费生态足迹、水足迹和碳足迹研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2011.
- [80] Curry R, Maguire C. The use of Ecological and Carbon Footprint Analysis in regional policy making: application and insights using the REAP model. *Local Environment: the International Journal of Justice and Sustainability*, 2011, 16(9): 917-936.
- [81] Page G, Ridoutt B, Bellotti B. Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 32: 219-226.
- [82] Xue X B, Landis A E. Eutrophication potential of food consumption patterns. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16): 6450-6456.
- [83] Lenzen M, Kanemoto K, Moran D, Geschke A. Mapping the structure of the world economy. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8374-8381.
- [84] Galli A, Weinzettel J, Cranston G, Ercin 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.
- [85] Ridoutt B G, Pfister S. Towards an integrated family of footprint indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(3): 337-339.
- [86] Ekins P, Simon S, Deutsch L, Folke C, de Groot Rudolf. A framework for the practical application of the concept of critical natural capital and strong sustainability. *Ecological Economics*, 2003, 44(2/3): 165-185.
- [87] Lugschitz B, Bruckner M, Giljum S. Europe's global land demand: a study on the actual land embodied in European imports and exports of agricultural and forestry products. Vienna: SERI, 2011.
- [88] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, Galli A, Ertug Ercin A, Weinzettel J, Steen-Olsen K. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 1-8.
- [89] 赵志强, 李双成, 高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用——以深圳市为例. *生态学报*, 2008, 28(5): 2220-2231.
- [90] Wiedmann T, Barrett J. A review of the ecological footprint indicator-perceptions and methods. *Sustainability*, 2010, 2(6): 1645-1693.
- [91] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [92] Kubiszewski I, Costanza R, Franco C, Lawn P, Talberth J, Jackson T, Aylmer C. Beyond GDP: Measuring and achieving global genuine progress. *Ecological Economics*, 2013, 93: 57-68.
- [93] 王如松. 生态整合与文明发展. *生态学报*, 2013, 33(1): 1-11.
- [94] Gudmundsson, H. The policy use of environmental indicators-learning from evaluation research. *The Journal of Transdisciplinary Environmental Studies*, 2003, 2(2): 1-12.
- [95] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III 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 H, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461(7263): 472-475.

- [96] Wiedmann T. Editorial: carbon footprint and input-output analysis-an introduction. *Economic Systems Research*, 2009, 21(3): 175-186.
- [97] Ridoutt B G, Huang J. Environmental relevance-the key to understanding water footprints. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(22): E1424.
- [98] Hanley N, Moffatt I, Faichney R, Wilson M. Measuring sustainability: A time series of alternative indicators for Scotland. *Ecological Economics*, 1999, 28(1): 55-73.
- [99] Wilson J, Anielski M. The Alberta GPI Accounts: Ecological Footprint. Drayton Valley: Pembina Institute, 2007.
- [100] Niccolucci V, Pulselli F M, Tiezzi E. Strengthening the threshold hypothesis: economic and biophysical limits to growth. *Ecological Economics*, 2007, 60(4): 667-672.
- [101] Wilson J, Tyedmers P, Pelot R. Contrasting and comparing sustainable development indicator metrics. *Ecological Indicators*, 2007, 7(2): 299-314.
- [102] Moran D D, Wackernagel M, Kitzes J, Goldfinger S H, Boutaud A. Measuring sustainable development-Nation by nation. *Ecological Economics*, 2008, 64(3): 470-474.
- [103] 白钰, 曾辉, 李贵才, 高启辉, 魏建兵. 基于宏观贸易调整方法的国家生态足迹模型. *生态学报*, 2009, 29(9): 4827-4835.
- [104] Huijbregts M A J, Hellweg S, Frischknecht R, Hendriks H W, Hungerbuhler K, Hendriks A J. Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(6): 2189-2196.
- [105] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 张蕾. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局. *生态学报*, 2010, 30(5): 1312-1321.