

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.04

碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较

尚海洋¹, 宋妮妮²

(1. 兰州财经大学农林经济管理学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州财经大学经济学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:基于概念和研究方法的视角,分析碳足迹和水足迹的起源和特征,比较二者的相似性和差异性,并讨论碳足迹与水足迹的应对策略,探讨两个领域的研究如何相互借鉴,以降低有关水足迹的错误认识、解释和应用的潜在风险。
关键词:碳足迹;水足迹;实践风险;方法学
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2018)02-0015-07

Carbon footprint and water footprint: comparison of concepts, methods, and policy responses

SHANG Haiyang¹, SONG Nini²

(1. College of Agriculture & Forestry Economics and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730000, China; 2. College of Economics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the perspective of concepts and research methods, analyze the origin and characteristics of carbon footprint and water footprint in this paper and compare the similarities and differences between them. Discuss the strategies to deal with the carbon footprint and the water footprint, to explore how to learn from each other in the two fields, which can reduce the potential risks of misunderstanding, interpretation, and application of water footprint.

Key words: carbon footprint; water footprint; practical risk; methodology

自工业革命以来,人类活动导致地球气候发生变化。越来越多的证据表明,化石燃料的燃烧导致了气温升高和极端天气事件。寻找减少温室气体排放的途径,需要了解导致温室气体排放的行为以及如何能有效减少它们。“碳足迹”(carbon footprint)已经成为测算与人类活动相关的温室气体排放的有力工具。而另一个全球关注的问题是淡水稀缺。水危机问题将对经济各部门产生深远影响,尤其是粮食安全方面^[1]。充足且合格的淡水是社会可持续发展的前提,也是自然生态系统健康循环的先决条件。在全球各地,淡水资源问题主要表现在含水层逐渐枯竭、河流干枯、水质恶化等方面^[2]。人类活动对水资源的过度开发将危及生态系统健康,因此,迫切需要探索水资源管理新方法,研究可持续用水的解决方案,以满足经济社会发展的供水需求,并保护重要的生态系统。“水足迹”(water footprint),主要用于研究人类消费与用水之间以及全球贸易与水资源管理之间的隐含联系^[3]。这一概念有助于了解生产、消费和贸易模式与用水之间的关系,以及在全球层面进行更科学的水资源管理。

尽管水足迹和碳足迹概念有相似之处,然而它们产生的根源和目的不同。碳足迹主要用于量化各

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目(16YJAZH051);国家社会科学基金西部项目(17XJY018);国家自然科学基金青年项目(41201595,41401653);甘肃省软科学项目(1604ZCRA020)

作者简介:尚海洋(1981—),男,教授,主要从事生态经济和区域经济方面的研究。Email: haiyangshang@sina.cn

种活动对气候变化的影响,水足迹主要用于探索供应链中的用水。虽然两个足迹具有不同的根源和特点,并且解决了不同的研究和政策问题,但在环境政策和企业社会责任领域的从业人员倾向于以与碳足迹相似的方式对待水足迹,如,没有深究是否对水资源适用,将“碳中和(carbon neutral)”和“碳抵消(carbon offset)”等热门议题转换为“水中和(water neutral)”和“水抵消(water offset)”^[4]。同样,开发类似于碳足迹标签的水足迹标签,以与碳足迹同样的方式将产品生命周期评估(life cycle assessment, LCA)应用于水足迹。最值得注意的是,如在碳足迹分析中所做的那样,倾向于解释水足迹的数量,而不考虑它的时空特征。由于每种足迹围绕不同的问题构建,所以需要在其特定的背景下展开研究。

本文主要是通过分析碳足迹和水足迹的起源和特征来了解它们的相似性和差异性,并从方法学的角度比较这两个概念,讨论相关的应对政策,以期两个领域的研究可以相互借鉴。

1 碳足迹和水足迹概念的起源

碳足迹和水足迹概念是在 2002 年前后相继产生的。碳足迹作为衡量温室气体排放的工具,主要集中在气候变化相关主题的讨论中;水足迹作为衡量与消费模式有关的用水量评估工具,主要应用于水资源管理相关领域。这两个术语都受到生态足迹(ecological footprint)的启发^[5]。无论是生态足迹、碳足迹、水足迹都是以不同的方式衡量人类对地球自然资源利用和自然资源的承载能力:EF 测量对生物生产性用地的使用,以公顷计算;水足迹测量每年淡水资源的使用量和污染量,以立方米计算;碳足迹测量每单位时间或产品造成全球变暖的 CO₂ 当量。所有足迹共同特征是均与具体的活动、产品和消费模式相联系,体现了自然资源在活动、产品中的嵌入。

1.1 碳足迹

随着全世界对于全球气候变化产生的原因及其后果的日益关注,1988 年组建了政府间气候变化专门委员会(the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)^[6]。IPCC 在 1990 年发布了第一份评估报告,在此背景下提出了《京都议定书》,总体目标是与 1990 年的排放水平相比,2012 年温室气体排放量减少 5.2%。为了实现该目标,《京都议定书》设置了排放交易体系和一些允许抵消温室气体排放的机制。排放交易体系(“碳市场”)允许国家出售未使用的排放许可证给超过排放目标的国家。除了排放许可证的交易外,《京都议定书》还允许通过各种抵消机制获得信用交易。与《京都议定书》

下的正式碳市场并行,自愿性碳市场随之出现。碳足迹越来越多地作为衡量与特定活动或产品相关的温室气体排放量的标准。

由于政府和企业对温室气体排放和全球变暖的关注,碳足迹演变成一个独立的概念,以温室气体排放量的 CO₂ 当量表示。尽管碳足迹在商业中得到普及和使用,但对于碳足迹仍没有普适性的定义,碳足迹概念主要由私人组织和企业界定。Wiedmann 等^[7]认为现有的研究不能对碳足迹的定义和方法提供统一性,因此将碳足迹定义为“衡量由直接或间接活动引起的或在产品的生命阶段积累的 CO₂ 总排放量”。Pandey 等^[8]将碳足迹描述为“在特定边界内,由个人或组织通过产品或项目排放到大气中以 CO₂ 当量表示的温室气体排放量”。这两种定义都没有将抵消考虑在内。然而,实际上企业倾向于宣称碳抵消减少了碳足迹。此外,并不确定碳足迹是否仅涉及直接或间接的温室气体排放。在理论研究和实践中,碳足迹广泛适用于不同的主体、过程、产品、企业、行业部门以及各种活动和组织的整个供应链(或所有生命周期阶段)^[9]。

1.2 水足迹

水足迹的概念内涵是阐明人类消费与水资源利用以及全球贸易与水资源管理之间的隐含联系。与社会实践中产生的碳足迹不同,水足迹来源于科学研究。大约从 2008 年开始,水足迹获得广泛的社会关注,当年所建立的水足迹网络(water footprint network, WFN),目标之一是构建一个系统而科学、符合各方利益的水足迹评估框架。2009 年,WFN 发布了水足迹核算(water footprint assessment, WFA)全球标准的第一版。本标准是 WFN 在与世界各地组织和研究人员进行讨论的过程中制定的,经过科学同行评审,展示了如何为不同实体核算水足迹,还包括评估水足迹可持续性的方法。虽然水足迹核算的定义和方法备受质疑,但目前还没有开发出完全替代的方法(与碳足迹的情况不同)^[10]。一般而言,水足迹评估的是淡水占用指标,以每单位时间用水量(蒸发或嵌入产品中)和污染量测算。水足迹概念更具体地针对特定的过程或产品,以及可以明确界定的消费者或生产者。从生产者和消费者的角度来看,水足迹得到的是直接和间接用水指标^[11]。水足迹是具有时空特征的指标,不仅刻画了用水量和污染量,还体现了用水地的区域特征。

2 碳足迹与水足迹的研究方法比较

碳足迹和水足迹概念互补,用于解决不同的环境问题——气候变化和淡水稀缺。尽管在定义和计

算 2 个足迹的方式上有相似之处,但两者在关键方面仍有差异(表 1)。如,年温室气体排放量的位置和时间是不相关的,而用水和水污染的位置和时间具有一定的相关性。了解两种足迹的相似性与差异性,对于制定科学、有效的应对政策是非常重要的。同时,这种比较可以帮助决策者清楚判断,依据一种足迹制定的缓解政策可以在多大程度上适用于另一种足迹。

碳足迹和水足迹都是“环境压力指标”,衡量人类对自然资源的利用和人为排放,但两者的评估结果均无法说明所引起 的具体环境变化。如,碳足迹虽刻画了温室气体排放量,但无法直接从评估结果中判读大气中温室气体浓度升高或随之而来的温度、蒸发、降水或海平面变化等^[12];水足迹虽表示人类对淡水资源的消耗和污染,而却无法揭示河流和含水层中径流和水质的变化。作为压力指标,碳足迹和水足迹既没有给出环境变化的后果,也无法揭示这些环境变化对人类(如健康)和生态系统(如生物多样性)的最终影响,但它们仍然是衡量人类施加于环境压力的有用指标。碳足迹和水足迹的减排战略旨在缓解环境变化及随之而来的社会和生态影响^[13]。

2.1 足迹构成

碳足迹包含与温室气体一样多的组成部分,而水足迹由 3 部分组成:蓝水(消耗地表水和地下水)、绿水(土壤水分)、灰水(与水污染相关)。

水足迹通常是 3 个构成部分的直接合计。而一些学者,借鉴碳足迹核算中对于不同温室气体排放量的加权核算思想,在水足迹测算中引入区域权重因子得到“升水当量”^[14],以比较水足迹的区域影响,这产生了对水足迹分析水稀缺问题的误解。水足迹目的不在于揭示当地用水量的水文影响,而旨在衡量淡水资源的使用情况,以便确定如何在竞争性需求中分配水资源。在当地水资源稀缺的基础上对水足迹区域加权,就像在石油存量稀缺的基础上

对两个地区进行石油消费加权——这是没有意义的,既无法解释“我的水足迹取决于你的水足迹”问题,也不能为企业减少水足迹进行适当的激励。

2.2 足迹核算

虽然碳足迹比水足迹应用更为广泛,但它没有标准统一的计算方法,常使用的碳足迹计算方法有自下而上、自上而下和混合方法 3 种。自下而上的方法,是基于 LCA(life cycle assesment, LCA)的一种通过“从摇篮到坟墓”的分析方法估计产品的环境影响。该方法主要用于产品和个体碳足迹的估算。虽然自下而上的方法产生了相对精确的结果,但是对数据的要求较高,容易带来系统边界和过程中断问题。自上而下的方法,用于计算较大范围的碳足迹,如部门、国家和地区,主要采用环境扩展输入输出分析(environment expansion input and output analysis, EE-IOA)^[15]。这种分析利用投入-产出模型,刻画国民经济中不同部门与最终消费、不同国家经济部门之间的相互依存关系,揭示了社会经济中不同部门之间的经济交易价值。混合方法,是将 LCA 分析的过程特性与 EE-IOA 的系统完整性相结合,保留了自下而上方法的精细性和准确性。

然而,水足迹核算具有统一的标准——由 WFN 于 2009 年发布并于 2011 年修订的全球水足迹核算标准^[16]。水足迹核算评估包括 4 个阶段,即制定目标和范围、核算、评估可持续性、提出应对措施。该标准涵盖过程、产品、公司、个人消费者和消费者群体的水足迹计算方法,并且还包括可持续性评估和应对措施的准则^[17]。水足迹核算主要有两种方法,即自下而上和自上而下。自下而上的方法,可用于各种水足迹核算,对各种各样的作物产品和农场动物产品进行产品水足迹研究,可以应用于所有水足迹计算。为了计算部门、省、国家和地区的水足迹,可以使用自上而下的方法来替代。采用自上而下方法的典型实践方式,是基于贸易数据和交易商品的

表 1 碳足迹与水足迹的研究方法比较

项目		碳足迹	水足迹
核算对象		人为温室气体排放量	人类对淡水资源的占用
核算单位		每单位时间或单位产品的排放量的 CO ₂ 当量	每单位时间或单位产品的水量
时空维度		排放时间和地点未指定,碳排放对象是可互换的	水足迹发生时间和地点特定,水足迹对象是不可互换的
足迹构成		碳足迹关注 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、HFC、PFC 等温室气体	蓝水、绿水和灰水足迹
可计算足迹的实体		产品、公司、行业、个人消费者、消费群体、地理区域	产品、公司、行业、个人消费者、消费群体、地理区域
计算方法		自下而上:适用于过程,产品和个体;包括 LCA	自下而上:适用于产品、部门、国家和全球研究
		自上而下:适用于部门,国家和全球研究;EE-IOA	自上而下:适用于部门,国家和全球研究; EE-IOA
		混合方法:用于产品、国家、组织的 LCA 和 EE-IOA	
范围		1. 直接排放;2. 电力导致的间接排放;3. 其他间接排放	直接和间接水足迹
足迹可持续		需要额外的信息评估碳足迹的可持续性	需要补充信息评估水足迹的可持续性
		需估算可允许的最大温室气体浓度,转化为碳足迹上限	需估计淡水可用性和废水自净能力,转化为水足迹上限
		对于具体的过程和产品,可以使用碳足迹基准	对于具体的过程和产品,可以使用水足迹基准

水足迹数据去分析国家的虚拟水平衡。在经典的自上而下的方法中,水足迹需要考虑地区的水资源总使用量加上虚拟水进口总量减去虚拟水出口总量^[18]。

3 基于碳足迹与水足迹的应对策略比较

对气候变化的关注越来越多,政府、企业和消费者正致力于减少活动和产品的碳足迹。两个主要的应对策略是减排和抵消。碳减排是指以低碳密集的方式行动——通过应用低碳技术提高碳排放效率,这种技术使得单位生产的温室气体排放量较少,或通过完全停止某些生产或消费行为实现。碳抵消是指通过在其他地方以某些形式的碳捕获或碳减少,采取外部行动来弥补特定碳足迹^[19]。如果某一活动的碳足迹被 100% 抵消,则称该活动是“碳中和”的。碳抵消和碳中和的概念被政府、企业、个人消费者广泛应用和支持。

虽然已经制定和实施了各种碳足迹减排和抵消机制,但是水足迹应对机制仍在探索中。现在,为水足迹提出了与碳足迹相似的应对政策,在这两个领域内出现了很多类似的概念,如碳减排与水减排、碳效率与水效率、碳抵消与水抵消、碳中和与水中和、碳上限与水足迹上限、碳许可证与水足迹许可证、碳标签与水标签等。在这些概念之中,除了已经应用了数十年的“水效率”,其他这些概念在水资源管理领域都是相对较新的。

缓解全球气候变化的思路和概念被引入到水资源管理领域,虽然卓有成效,但也存在一定风险。水资源不同于碳排放,所以碳排放解决方案是否可以复制于水,备受质疑。此外,并非所有为解决碳排放问题开发的方案都是有效的,所以在应用于其他地方之前应该进行严格的评估。水抵消和水中和将会有很大的市场,与碳抵消和碳中和市场相当,但是,这个市场将在多大程度上促进更有效、可持续和公平地利用全球水资源,将取决于市场规律。

3.1 减少需求实现最大可持续足迹水平

人们普遍认识到碳足迹和水足迹已超过可持续发展水平,现实经济社会必须不遗余力地减少它们。明确上限有助于制定减排战略,但确定可以被广泛接受的最大可持续发展水平的碳足迹与水足迹仍是比较困难的,也包括之前较为流行的生态足迹分析,各种足迹分析都存在这样的弊端。全球人为碳足迹的最大可持续发展水平取决于导致全球气温升高的最大值,而这又取决于人们的预期。2009 年哥本哈根举行的联合国气候变化大会上商定:全球气温的升高应该不超过 2℃,长期存在的挑战是将温室气体浓度稳定在一个特定水平^[20]。目前,人为温室气

体排放量已远远超出设定水平。虽然《京都议定书》中各政府承诺将本国温室气体排放量减少一定百分比是远远不够的,但将设定温室气体排放上限的想法制度化,是《京都议定书》最大的成就。未来,减少全球碳排放的重点应该是坚持这个想法,并进一步协商各国温室气体排放的上限,建立机制以确保上限不会被突破(甚至随着社会经济发展和时间推移降低上限)。

同碳足迹一样,确定人类最大可持续发展水平的水足迹也并不容易。对于水足迹而言,全球最大可持续水平的水足迹是所有地区最大可持续发展水平水足迹的总和^[21]。此外,还需要关注时间这个关键因素,正如 Hoekstra 等^[22]指出的,在某些时期不可持续的水足迹会变得更加明显,每个地区(特别是一些集水区)必须确定月而不是年最大可持续水足迹。在评估全球最大可持续水足迹方面进行的研究较少,Ridout 等^[23]认为全球水足迹必须减少约一半,才有希望达到可持续水资源利用水平,并且考虑到农业和工业的水生产力提高潜力以及可以采取限制食物链浪费,这样的目标是可以实现的。

在减少水足迹的背景下,减少最缺水地区的水足迹值应优先考虑,但对于水源充足流域的水足迹减少是否合理仍有争议。正如 Hoekstra 等^[24]主张的,减少水足迹需要全球行动,在水资源稀缺的地区,解决过度开发蓝水资源的办法之一,是增加水资源丰富地区的水生产力(降低产品水足迹)。水源充足的地区往往表现出低的生产力,因此出现较高的产品水足迹。尽管这些地区的用水对当地的环境影响很小,但是它们不受水政策的约束是错误的。

3.2 通过提高碳效率和水效率来减少足迹

碳效率是一个被广泛接受的概念,指的是一个经济体单位 GDP 的碳足迹,或更具体地针对特定部门或活动的碳足迹^[25]。政府和企业通常将减少碳足迹的目标转化为提高工业、交通和家庭能源效率的要求,假定每单位商品或服务生产降低的能耗能自动转化为减少温室气体排放。此外,需要从诸如对煤炭和石油等碳密集型能源的依赖,转变为对低碳密集型能源(如天然气)的使用,以及提高可再生能源(如风能、太阳能、水电或生物能源)的利用比例。

虽然提高能源效率和转向可再生能源的战略似乎很简单,但它们并不总是像预期的那样可有效减少温室气体排放。在实践中,提高能源效率不一定与减少能源的总使用量相关。更高效的生产意味着可以用更少的能源生产相同的产品,或同样的能源可以生产更多产品。因此,提高能源效率有助于提

高生产和消费水平。不以资源或能源使用的减少为代价而提高资源或能源效率被称为“反弹效应”^[26]。如,一些涉及新能源生产的可再生项目投资,可能只是增加能源的总用量,而不能取代化石能源的使用。

在《水足迹评估手册》中,由于引入了工业部门的“零蓝水足迹”和“零灰水足迹”概念,有关减少水足迹的可能性技术受到关注。作物生产水足迹的巨大变化表明,生产力的提高和减少水足迹的潜力很大。如,在农业中提高水效率,使用滴灌代替喷灌(减少蓝水足迹)和有机农业替代传统农业(减少灰水足迹);推出各种生产工艺(过程)和最终产品的水足迹基准,以便通过对生产过程和最终产品的工艺控制实现减少水足迹的目标。

在提高水效率的同时,讨论反弹效应是十分必要的。只有当生产活动减少的水足迹不会因产量的提高而增加,降低流域生产、商品及消费的水足迹水平才有助于减轻流域水资源的压力。

3.3 通过改变生产和消费模式减少足迹

提高效率只是减少碳足迹和水足迹的解决方案之一。现有的生产和消费模式对能源和水的固有依赖,不能仅靠提高效率来解决。如,在生产方面,许多供应链的国际化性质导致对运输能源的内在依赖。只有供应链重组才能减少长途运输的能源需求。现有的生产模式普遍是水密集型的。只有全球作物产量与雨量充足的地区相一致,才能有效减少作物的蓝水足迹。消费模式也需要注意。Steinfeld等^[27]估计,畜牧业部门温室气体排放占人为温室气体总排放量的18%,只有扭转继续消耗大量肉类和乳制品的趋势,才能减少温室气体排放量。

重新考虑生产和消费模式比实施提高效率的措施要困难得多,因为结构性变化影响各方既得利益。这就解释了为什么减少足迹更关注于效率,而不是生产总量和消费总量。一般而言,生产者和消费者都希望提高生产和消费水平。由于存在反弹效应,关注效率的碳足迹和水足迹降低策略可能会失败。碳效率和水效率提高需要与总碳足迹和水足迹的上限相结合。

3.4 抵销、中和与交易

碳抵消的做法是从《京都议定书》所包含的灵活机制中开发出来的,允许工业国家通过购买其他项目所产生的减排量来履行其减少温室气体排放的义务。这种机制是由市场逻辑造成的需求和供给减少,在国际市场上进行定价和交换,并通过并行的自愿市场进一步发展^[28]。自愿市场的一个典型例子是,在航空运输部门,乘客可以通过在其他地方购买减免额来抵消其与飞行有关的排放。另一个例子是

通过购买可再生能源或种植林项目产生的碳信用额来抵消排放。

虽然抵消的概念基于一些特定逻辑,但是其测量、核算是主要关注的问题,特别是自愿抵消。关于哪些行动可以抵消没有明确的定义,并且没有标准化的方法来计算可以抵消的碳足迹。Murray等^[29]在对企业和个人提供碳抵消的商业网站中发现,这些企业对所需的抵消不具有相似的价值、不具备相同的投入和计算方法,甚至对于相等的碳足迹值也没有相同的定价。缺乏标准化和透明度是自愿抵消市场的主要问题。抵消的另一个担忧是碳封存(碳回收)和其他碳信用项目的可信度。此外,抵消允许污染者继续排放,这是关于减少碳足迹的错误引导信号。有很多迹象表明,自愿抵消机制对整体碳足迹减少的影响较小。没有一个完整、系统的会计核算制度使得评估整个系统的有效性变得非常困难。

水抵消的思路也不断深入人心。然而,相对于碳抵消,水抵消的概念仍然不明确。据 Hoekstra等^[30]研究,实施水足迹减少措施后,仍然需要采取措施来弥补水足迹的负面影响。“水抵消”定义的两个缺点是:没有具体说明哪些补偿措施和哪一水平的补偿足以抵消一定的水足迹影响;没有说明哪些影响应该得到补偿,以及如何衡量这些影响。一个不明确的概念很容易被滥用——在“抵消”旗帜下采取的措施可能是一种“绿水清洗”形式,而不是旨在充分抵消水足迹的真正努力。此外,水足迹及其相关影响一般带有区域性,在这方面水足迹与碳足迹显著不同。

3.5 行为者的相互作用

碳足迹减少的挑战依赖于各种行为者:政府、企业、投资者、个人消费者。为了限制或减少温室气体排放,各国政府一直在采取各种政策措施,如制定法规和标准、实行税收和补贴、创建碳信用市场、推行自愿行动、设立研究计划等。同时应用4个标准来评估每种措施的有效性:环境效益、成本效益、分配效应和制度可行性。值得注意的是,仅依靠碳足迹特定政策不足以实现碳足迹削减目标,关于减贫、土地使用、贸易、污染、农业、粮食安全和人口的政策都应该一并考虑在内。

立法、法规和标准是环境政策的典型工具。当企业和消费者没有自愿采取行动时,它们是非常有效的工具。如,美国加州的全球变暖解决法案和英国低碳转型计划。这些例子表明,监管标准在减排方面是有价值的,有效刺激消费者和行业减少足迹。监管措施和标准的有效性取决于其严格性。除监管

干预外,政府可以通过征税和补贴来干预市场,推行利于减排的消费模式。对排放征税在环境和成本方面都是有效的,但可能产生分配和制度上的问题。税收也可能对整体排放无效,因为它们为污染者提供了替代方案,即对污染缴纳税款代替对减排进行投资。此外,税收不是普遍的政策工具,财政激励才是政府通常用来刺激新技术的政策工具。

通过政府的法规和政策,企业已经开始认识到低碳经济正在兴起,并且他们将很快面临与温室气体排放有关的税收、上限和其他规定。目前,碳足迹核算和减排已成为许多企业的重要议题。企业迅速并积极反应的主要驱动力是如何使自身在低碳经济中继续发展,并且发挥优势。同时,公众对气候变化的关注和消费者行为的变化也促进了企业的快速转型,如英国的一项调查显示,44%的消费者愿意为低碳足迹产品支付更多的费用。企业进而对消费者的这些变化做出反应,可以在低碳经济中发现新商机、创造新市场、改变生产体系、投资低碳技术。

对碳足迹的社会反应涉及许多行为者采取的应对措施。而这是相互影响的,是整体响应中的一个基本要素。但是目前,无法反映政府、企业在水足迹领域采取的各种措施。大多数跨国企业已经开始核算其部分产品的水足迹并探讨应对策略。越来越多的水足迹计算器出现,环境组织(如世界野生动物基金会和大自然保护协会)开始在宣传活动中使用水足迹这一概念。根据碳足迹的经验,如果没有强有力的政府引导,很难取得实质性进展。需要立法,制定法规和标准来刺激消费者和行业减少水足迹。对不同的水足迹组成部分区别应对是十分重要的,特别是为了确保最优利用和分配稀缺的水资源,对蓝水足迹和灰水足迹进行严格规定是必要的。补贴和经济激励措施有助于促进新技术的产生,提高水的利用、再利用和回收利用效率,更好地处理废水^[31]。

4 结 论

碳足迹和水足迹概念几乎同时被引入,但彼此独立。尽管缺乏科学接受和普遍采用的指导方针,但碳足迹这一概念被公众和媒体广泛接受和使用,已有多种关于碳足迹核算的方法和途径。自2008年以来,水足迹成为流行词汇。虽然在早期阶段,水足迹的含义和方法已经在科学文献中得到了很好的界定,但是同碳足迹一样,这个术语的使用并不严格。全球变暖和减少温室气体排放是当今环境政策议程的重中之重。两个主要的应对策略是减排和抵消,这些策略得到政府和企业的广泛应用和支持。

从分析看,虽然碳足迹目前没有普遍的指导原则,但碳足迹已经成为社会广泛使用的概念。水足迹也越来越受欢迎,并且在诸多方面特别是应对政策方面存在与碳足迹相同的问题。通过对碳足迹概念被广泛采用背后的机制进行分析,可在总结经验的同时降低水足迹推广、实践中的潜在风险,如反弹效应、抵消机制效果、特定位置发生的时效性等。

参考文献:

[1] 王丹阳,李景保,叶亚亚,等. 基于不同受纳水体的湖南省农业灰水足迹分析[J]. 水资源保护,2016,32(4):49-54. (WANG Danyang, LI Jingbao, YE Yaya, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Hunan Province based on different receiving water bodies [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 49-54. (in Chinese))

[2] 黄晶,王学春,陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示[J]. 水资源保护,2016,32(1):135-141. (HUANG Jing, WANG Xuechun, CHEN Fu. Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 135-141. (in Chinese))

[3] 孙静,白雪,朱春雁,等. 生态足迹、碳足迹相关经验对水足迹评价的启示[J]. 标准科学,2014(8):25-29. (SUN Jing, BAI Xue, ZHU Chunyan, et al. Enlightenment from ecological footprint and carbon footprint assessment experience for water footprint assessment [J]. Standard Science, 2014(8): 25-29. (in Chinese))

[4] van KOOTEN G C. The challenge of mitigating climate change through forestry activities: what are the rules of the game[J]. Ecological Economics, 2018, 146: 35-43.

[5] 郑德凤,张雨,孙才志,等. 基于可持续能力和协调状态的水资源系统评价方法探讨[J]. 水资源保护,2016,32(3):24-32. (ZHENG Defeng, ZHANG Yu, SUN Caizhi, et al. Study of method for evaluation of water resources system based on sustainability and coordinated condition [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 24-32. (in Chinese))

[6] 秦天宝. 论《巴黎协定》中“自下而上”机制及启示[J]. 国际法研究, 2016(3): 64-76. (QIN Tianbao. The “bottom-up” approach in the paris agreement and its enlightenment [J]. Chinese Review of International Law, 2016(3): 64-76. (in Chinese))

[7] WIEDMANN T, WOOD R, MINX J, et al. A carbon footprint time series of the UK: results from a multi-region input-output model [J]. Economic Systems Research, 2010, 22(1): 19-42.

[8] PANDEY D, AGRAWAL M, PANDEY J S. Carbon footprint: current methods of estimation [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 178(1/2/3/4): 135-160.

[9] MARTINEZ S, MARCHAMALO M, ALVAREZ S. Organization environmental footprint applying a multi-

- regional input-output analysis: a case study of a wood parquet company in Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 7-14.
- [10] CAO Xinchun, WU Mengyang, SHU Rui, et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: a case study of irrigated paddy rice in East China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 84-93.
- [11] MEHTA L. Whose scarcity? Whose property? The case of water in western India [J]. *Land Use Policy*, 2007, 24 (4): 654-663.
- [12] 吴兆丹, 赵敏, Upmanu L, 等. 关于中国水足迹研究综述 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23 (11): 73-80. (WU Zhaodan, ZHAO Min, UPMANU L, et al. A Review of researches on Chinese water footprint [J]. *China Population Resources and Environment*, 2013, 23 (11): 73-80. (in Chinese))
- [13] FREMSTAD A, UNDERWOOD A, ZAHARAN S. The environmental impact of sharing: household and urban economies in CO₂ emissions [J]. *Ecological Economics*, 2018, 145: 137-147.
- [14] 方恺. 环境足迹的核算与整合框架: 基于生命周期评价的视角 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (22): 7228-7234. (FANG Kai. A framework for quantification and integration of environmental footprints: from the perspective of life cycle assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (22): 7228-7234. (in Chinese))
- [15] EWING B R, HAWKINS T R, WIEDMANN T O, et al. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 1-8.
- [16] 黄凯, 王梓元, 杨顺顺, 等. 水足迹的理论、核算方法及其应用进展 [J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33 (4): 78-83. (HUANG Kai, WANG Zhiyuan, YANG Shunshun, et al. Theory, calculation method and application progress of water footprint [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33 (4): 78-83. (in Chinese))
- [17] FANG K, HEIJUNGS R. Investigating the inventory and characterization aspects of foot printing methods: lessons for the classification and integration of footprints [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108 (1): 1028-1036.
- [18] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省 (区) 2000 年的水资源足迹 [J]. *冰川冻土*, 2003 (6): 692-700. (LONG Aihua, XU Zhongmin, ZHANG Zhiqiang. Estimate and analysis of water footprint in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003 (6): 692-700. (in Chinese))
- [19] ANDERSON B, BERNAUER T. How much carbon offsetting and where? Implications of efficiency, effectiveness, and ethicality considerations for public opinion formation [J]. *Energy Policy*, 2016, 94: 387-395.
- [20] NIETO J, CARPINTERO O, MIGUEL L J. Less than 2°C? an economic-environmental evaluation of the Paris Agreement [J]. *Ecological Economics*, 2018, 146: 69-84.
- [21] ROUX B I, van der LANN M, VAHRMEIJER T, et al. Establishing and testing a catchment water footprint framework to inform sustainable irrigation water use for an aquifer under stress [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 1119-1129.
- [22] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [M]. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2002: 35.
- [23] RIDOUTT B G, HUANG J. Environmental relevance - The key to understanding water footprints [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109 (22): E1424.
- [24] 徐慧芳, 王溯. 国外流域综合管理模式对我国河湖管理模式的借鉴 [J]. *水资源保护*, 2016, 32 (6): 51-56. (XU Huifang, WANG Su. Study of an integrated river basin management model and its implications for river and lake management in China [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32 (6): 51-56. (in Chinese))
- [25] ZHAO Xingang, WU Lei, LI Ang. Research on the efficiency of carbon trading market in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 1-8.
- [26] 范如国, 罗明. 中国能源效率演化中的异质性特征及反弹效应影响 [J]. *经济管理*, 2014, 36 (6): 1-12. (FAN Ruguo, LUO Ming. The analysis of the spatio-temporal heterogeneity and the impact of rebound effect in the evolution of energy efficiency in China [J]. *Business Management Journal*, 2014, 36 (6): 1-12. (in Chinese))
- [27] STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T, et al. Livestock's long shadow: environmental issues and options [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006: 68-73.
- [28] 田贵良, 杜梦娇, 蒋咏. 水权交易机制探究 [J]. *水资源保护*, 2016, 32 (5): 29-33, 52. (TIAN Guiliang, DU Mengjiao, JIANG Yong. Study on water rights trading mechanisms [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32 (5): 29-33, 52. (in Chinese))
- [29] MURRAY J, DEY C. The carbon neutral free for all [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3 (2): 237-248.
- [30] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M, CHAPAGAIN A K, et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability [J]. *PLoS ONE*, 2012, 7 (2): 326-388.
- [31] 郝光玲, 王烜, 罗阳, 等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价 [J]. *水资源保护*, 2017, 33 (6): 27-31. (HAO Guangling, WANG Xuan, LUO Yang, et al. Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33 (6): 27-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-11-24 编辑: 彭桃英)