

水足迹与水资源可持续性研究进展*

丁天璁 于德永[†]

(北京师范大学人与环境系统可持续性研究中心, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 地理科学学部, 100875, 北京)

摘要 对水足迹研究所取得的成果进行了归纳与总结, 介绍了水足迹的概念及由来, 概述了水足迹的核算方法, 以及食品-能源-水系统关联过程中的能源、食品和水资源之间的相互作用, 强调未来研究应重视食品-能源-水系统关联研究方法, 并运用“环境足迹族(水、生态、能源、碳、土地、氮、磷足迹)”指标评价人与环境系统的综合表现, 探讨在满足人类需求的同时, 降低环境足迹的资源利用方案。

关键词 水资源; 食品-能源-水系统; 可持续性; 人类福祉; 环境足迹

中图分类号 X37

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020052

人口急剧膨胀和人类活动规模的扩大, 使地球进入了一个新的地质时代——“人类世”^[1], 表明人类对气候、生态和资源的巨大影响, 随之而来的是更多社会、经济和环境问题。联合国预测全球人口数量到2100年将会由当今的77亿增长到109亿人^[2], 人口的快速增长使得工业、农业和其他生活用水量随之增长。联合国粮农组织评估报告认为, 土地利用变化导致下垫面生物物理性质发生改变, 进而影响到水循环^[3]。水资源与气候、土壤、植被和地貌等多种自然因素都有关, 其中气候变化的影响尤为显著。气候变化导致极端气候事件频发, 并且引起了降水的时间、地点及部门之间分配更加不平衡, 使更多地区受到水资源胁迫^[4]。经济快速增长改变了人类的生产和消费模式^[5], 虽然随着科技的进步, 水资源利用率得以提高, 但水资源的利用量和生产生活中所产生的污水仍呈增加趋势。正如联合国开发计划署强调的, 用水和水污染是造成水资源短缺的2大关键因素^[6], 它不仅对环境可持续性和公共健康构成威胁, 还加剧了淡水的竞争^[7]。人们的消费模式也由粮食作物向肉类和乳制品转变, 再加上国际贸易的大幅增加, 蕴含在产品中的水资源量随之增加。人口增长、土地利用变化、气候变化和经济增长导致水需求显著上升, 而水资源的数量和质量却呈下降趋势, 相应出现土壤质量下降和生物多样性丧失等生态环境恶化现象, 与淡水稀缺和污染有关

的问题正成为人们日益关注的重点亟待解决难题。

世界经济论坛在2015年的全球风险报告将水资源危机确定为当代首要高影响的风险^[8]。国际水文科学协会将水资源问题作为2013—2022年科学研究的重点, 联合国也将“大幅度减少缺水人数”作为可持续发展目标之一。

本文首先介绍水足迹的概念和由来, 然后回顾农业和能源部门生产与消费过程中水足迹核算的方法和发展进程, 并结合可持续发展的概念, 对水资源可持续性评价方法进行总结, 最后讨论当前研究存在的不足以及未来研究展望。

1 水足迹概念与由来

水足迹概念是在虚拟水理论上发展起来的。虚拟水由Allan^[8]在1993年提出, 指产品和服务的生产过程中所需要的水资源量。它是以“看不见”的形式嵌入在产品中的水, 如生产1 000 kg小麦需耗水1 000 m³, 那么1 000 m³就是这1 000 kg小麦的虚拟水含量。荷兰学者Chapagain等^[9]2002年首次明确提出水足迹概念, 它指的是在特定时间和空间内所有产品和服务所需要的水资源量, 形象地被表示为水在生产 and 消费中踏过的足印(water footprint), 其思想源于“生态足迹”理论。Aldaya^[10]于2011年首次发布了《水足迹评价手册》, 此后水足迹概念引起世界各国政府和学者的关注。

* 国家自然科学基金资助项目(41971269)

[†] 通信作者: 于德永(1973—), 男, 博士, 教授。研究方向: 城市化及其环境效应、景观可持续性、全球变化与环境风险。E-mail: ydy@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-04

水足迹与虚拟水概念既有联系也有区别。共同点在于二者均可用来分析人类生产和消费、水资源利用和管理之间的联系。二者区别在于:从概念内涵角度看,虚拟水侧重描述产品生产过程中消耗的水资源,即透过某种产品看到它背后蕴含的水消耗量,它是区别于实体水的概念;而水足迹用来描述生产和消费2个过程中水消耗量。从核算对象角度看,虚拟水侧重于蓝水和绿水的核算;而水足迹加入了灰水的核算。从核算范围角度看,虚拟水的方法多用于农产品,它是权衡水资源短缺与粮食安全关系的有效手段;水足迹的核算拓展到了个人、家庭、部门、区域和国家层面的各类产品和服务。水足迹相较虚拟水更为完善和先进之处在于:虚拟水只能表征用水量;水足迹除用水量外还可以表征用水的时间、地点及类型^[1],并可以进一步衡量人类对地区生态环境的影响。

水足迹概念拓宽了水资源研究的范畴,它将水资源的消费方式和对生态系统的影响紧密联系起来,不仅为水资源综合管理开辟了新的思路,而且为实现水资源可持续利用提供了崭新的视角^[12-13]。

2 水足迹构成及核算方法

2.1 水足迹构成 水足迹是用水量的多维测量指标,就用水类型而言,包括蓝水、绿水和灰水^[14-15],其中:蓝水是指河流、湖泊、湿地和含水层中的液态水,在传统水资源相关研究中应用最为广泛;绿水包含绿水流和绿水储量,前者指地面、水体和植被蒸发的水汽流,后者指在非饱和带中保持的土壤水,由降水形成并可供植物使用^[16-17];灰水是衡量水污染程度的指标,定义为达到现有环境水质标准,吸纳污染物所需的淡水量^[9]。就用水边界而言,水足迹包括内部水足迹与外部水足迹^[14],某地区的内部水足迹是指不包括进口产品和服务的用水量,而外部水足迹是以虚拟水的形式包含在进口产品和服务中的水量。水足迹具有不同时间和空间尺度的特征,空间尺度如全球、国家、省、市或流域,时间尺度如年、月或日等。

2.2 水足迹核算 人类在多大程度上达到甚至超过了淡水资源行星边界(planet boundary),是全球可持续发展关注的重要议题^[18]。如图1所示,食品、能源、水都是人类生存不可缺少的重要资源,三者相互依存、相互作用,构成食品-能源-水系统(food-energy-water, FEW)^[19]。在气候变化和社会变化的背景下,既保持生态系统健康,又为不断增长的人口提供足够的食物、能源和水资源,核算由此产生的水

足迹,对于确保人类水安全、粮食安全和能源安全都具有重要意义。

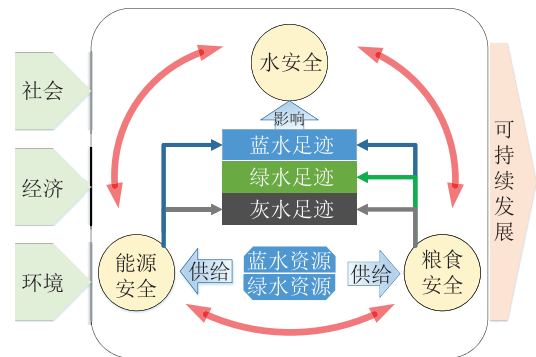


图1 水足迹与食品-能源-水系统间的联系

2.2.1 食品生产的水足迹核算方法 在农业生产过程中:蓝水足迹是指作物田间灌溉的蒸散量(evapotranspiration, ET),绿水足迹是指作物生长期间田间总降水ET,灰水足迹并非在生产过程中所使用的真实水量,而是由于稀释化肥和农药等不合理使用形成的污染物所消耗的水量^[20]。

农业水足迹通常按照Allen等人^[21]的计算:1)绿水足迹,当ET高于作物生长期间的有效降水量(precipitation, P),绿水足迹等于有效P;如果ET低于有效P,则绿水足迹等于ET。2)蓝水足迹,其取决于作物对水资源短缺的耐受性、灌溉效率和绿水的充足性。如果ET高于P,蓝水足迹等于ET和P之间的差异量;否则,蓝水足迹为零。蓝水足迹的核算需要完备的灌溉、土壤和作物数据进行支持。3)灰水足迹,它取决于污染物和多种环境因素,农业生产中由于施用氮肥的缘故,氮通常为主要污染物。最终,农业生产总水足迹由3部分加和可得。

计算农业生产水足迹的常用模型有CROPWAT模型^[22-23]、GEPIC模型(GIS-based environmental policy-integrated climate model)^[24]、EPIC模型(environmental policy-integrated climate model)^[25]及AquaCrop模型^[26]等,它们在国内外研究中得到广泛应用。例如:Liu等^[27]基于GEPIC模型对全球范围内的农田蓝水和绿水足迹进行了核算;薛冰等^[28]基于CROPWAT模型分析了1980—2016年辽宁省水稻、小麦和玉米的生产水足迹结构及动态变化。CROPWAT模型核算的作物种类广泛并在全世界地区可用,但此方法参数本地化有待加强,故而核算结果精度有待提高。EPIC模型和GEPIC模型等核算精度较高,可为比较不同地域农业水足迹核算结果提供依据。

国际上核算水足迹多选取全球尺度和国家尺度。例如Tuninetti^[29]在全球尺度上对小麦、水稻、玉

米和大豆的绿水和蓝水消耗量进行了计算。水足迹自 2003 年引入中国,国内学者大多在国家、省、市或特定区域尺度上开展水足迹研究。例如:孙世坤等^[30]量化了中国 5 种主要粮食作物的水足迹,并据此设计作物消费结构情景以探究减少农业用水的有效途径;王杰等^[31]通过对 1991—2015 年新疆农作物水足迹和经济因素的空间分布规律的分析,得出水-经济的空间分布不均衡性逐渐降低。水足迹研究尺度的选择关系着政策的制定,全球尺度的研究旨在识别农业高耗水国家以降低全球农业水足迹;区域尺度更侧重于结合本地食品生产和消费特征,达到优化食品生产和消费结构的目的。

2.2.2 能源生产中的水足迹核算方法 国际能源署将能源安全定义为“以可承受的价格不间断地获得能源供应”。水和能源是至关重要且密切相关的资源,“水-能源联系”一直是研究的热点。能源行业是水资源密集型行业,水资源质量、数量和可获取性降低使得能源供应的可持续性受到了威胁^[32]。并且,能源系统的温室气体排放导致全球水循环格局的变化,它们相互作用使得能源和水的关系更不稳定^[33]。能源生产中的水足迹来源于开采、加工和净化污染阶段^[34],主要以蓝水足迹和灰水足迹为主。了解能源生产过程中的水资源消耗和环境污染,以及根据水资源储量规划能源产业发展,是提高水资源利用效率的重要途径^[35]。例如:Peña 等^[36]采用生命周期的方法,量化了智利北部的阿塔卡马沙漠中矿石开采和处理的蓝水足迹;Gu 等^[37]提出了一种系统边界分析方法,核算了我国东部钢铁制造业的钢铁蓝水足迹和灰水足迹。

能源生产水足迹核算多用生命周期评价和投入产出法。丁宁等^[38]基于生命周期法核算中国煤炭生产的水足迹,从能源开采、洗选、运输到使用全过程进行分析,为能源系统水足迹的核算提供了方法。能源生产水足迹核算包括小尺度和大尺度。小尺度的研究侧重于评估部门间的资源流动。Wang 等^[39]以北京为例,采用投入产出分析和能值法相结合,探讨了制造业、农业和建筑业等 8 个部门间能源和水的流向及流量。大尺度的研究旨在评估和指导不同地理尺度的水和能源管理。Xu 等^[40]构建了中国省际能源和虚拟水网络,并分析了各省水与能源消耗间的关系;关伟等^[41]对我国 5 种化石能源和电力生产水足迹进行核算,从空间格局角度探究了中国能源水足迹与水资源的匹配关系。国内外能源水足迹研究集中于特定的能源种类和工业部门,尤其是电力行业和矿产开采行业。原因主要在于能源水足迹

的核算需要建立完整的生产链,受能源种类、生产工艺和各环节数据支持的影响,生产链难以构建;另外,工业和能源产品在虚拟水贸易中占比较小,研究重视程度不够。

2.3 FEW 关联 水足迹方法旨在对水资源进行综合管理。哈佛水资源计划^[42]最早提出跨学科、综合社会和环境多方面因素进行水资源管理,但包括此计划在内的众多水资源管理计划 IWRM(integrated water resources management)实施效果并不理想,原因主要有 3 方面:1) IWRM 计划试图整合所有与水看似相关的资源要素,但实际上并未明确定义其范围;2) IWRM 计划仅围绕水资源展开,核算目的单一;3) 尺度问题,过去水资源核算方法大多局限于流域尺度,涉及能源和食品等以行政单元为统计单位的资源,核算方法具有一定局限性。FEW 同样采取了跨部门整合的方法,但其更先进之处在于:1) FEW 具有更明确的核算对象,即食品、能源和水资源;2) FEW 不必仅仅围绕水展开研究,农业和能源部门的利益相关者更容易参与其中;3) 尺度的选择更灵活自由,流域和行政单元都可作为研究单元。2011 年世界经济绿色发展大会指出食品、能源、水资源是人类可持续发展的重要支撑,水资源在 FEW 中起着核心作用^[19],将水足迹纳入到 FEW 的研究框架下,是实现 FEW 有效管理的重要途径。

过去的研究大多关注二者之间的关系,尤其是将水足迹应用于“水-粮”关联和“水-能”关联研究。2011 年世界经济绿色发展大会后 FEW 的研究急剧增加,其研究内容包括 3 方面:1) FEW 关联的概念;2) FEW 关联建模与模拟;3) 案例应用研究,识别 FEW 的权衡和协同作用,为区域可持续发展制定跨部门政策。研究 FEW 的方法有:1) 环境足迹法,如 Vanham 等^[43]探讨了水足迹对 FEW 关联的适用性;2) 经济学方法,如可计算的一般均衡模型;3) 集成模型法,如 Dale 等^[44]在气候变化的背景下,结合水文模型和长期能源替代规划,系统分析了美国加利福尼亚州的发电系统水和能源消耗量;4) 专门用于评价 FEW 关联的在线建模平台,如“FEW 关联评估工具 2.0”^[45]等。全球、国家和跨区域尺度的研究较多,城市尺度的研究较少。Ramaswami 等^[46]从城市系统角度分析了印度新德里食品、能源和水之间的联系。国内 FEW 关联研究起步较晚,但正日益受到重视。例如:李桂君等^[47]采用系统动力学建模方法,对北京市 FEW 的可持续性做出了评价;Han 等^[48]考虑经济效益、社会效益和负面环境影响,评价了 2005—2017 年中国省级行政区 FEW 关联的效率、耦合度

和协调耦合度。FEW 关联研究,被认为是合理利用资源、实现区域可持续发展的重要突破方向。

3 水资源可持续性评价

水作为自然生态系统提供的人类赖以生存的重要资源,其可持续利用是实现区域可持续发展的重要保障。水资源可持续性是指依据可持续发展理论,保障生态系统结构稳定,并支持社会和经济可持续发展,其核心任务是在保护环境的前提下有序发展经济,满足当代人和后代人的用水需求^[49]。水资源可持续性评价从环境、社会和经济3个维度评估。水资源可持续性评价最初被命名为“影响评价”,分为初级影响和次生影响^[9]。初级影响指水质和水量的变化,使用水资源短缺的相关指标表征。当前水资源可持续性评价指标与方法如表1所示。早期水资源短缺评价方法主要关注蓝水,忽视了绿水和灰水,且未考虑水资源空间和时间的变化,应用较为广

泛的有 Falkenmark 指数^[50]、水足迹与可用水量的比率^[51]和水资源贫困指数(water poverty index, WPI)^[52]。在应用方面: Karabulut 等^[53]利用 Falkenmark 指数对多瑙河流域缺水情况进行了评估;刘静等^[54]利用水足迹与可利用水资源量的比值关系,评价了中国水资源利用情况。2000年以后,出现了具有高空间分辨率的水资源可持续性评价方法,并开始考虑绿水、灰水(水质)以及环境需水量。第一个关于绿水短缺的评价方法为绿水-蓝水指数^[55],该指数通过比较蓝绿水足迹和当地可用的蓝绿水资源来衡量水资源短缺程度,将水质污染引起的缺水指标用灰水足迹与水资源量的比率来表征,这是基于水足迹理论对水资源供需指数做出的改进。Zeng 等^[56]综合考虑水质与水量指标,通过计算水足迹与流域水资源量的比值,对北京市水资源供给与利用进行了分析。数量-质量-环境需求量指数(quantity-quality-environment, QQE)综合考虑了水质、水量及环境需水量^[57]。

表1 水资源可持续性评价指标与方法

指标与方法	蓝水	绿水	水质	环境需水量	优点	缺点	空间显式
Falkenmark指数	√	×	×	×	数据易获取,指标易理解	不考虑水质	√
水足迹与可用水量的比率	√	×	×	√	数据易获取,指标易理解,应用广	指标简单,能表征的详细信息较少	√
水资源贫困指数(WPI)	√	×	×	×	考虑了水资源、供水设施、利用能力、使用以及环境5个维度	数据庞大,专家打分具有主观性	×
绿水-蓝水指数	√	√	×	√	直观易理解	不考虑灰水影响	√
数量-质量-环境需求量指数(QQE)	√	×	√	√	考虑了水量、水质和环境需水量	数据要求高	√
生命周期评价(LCA)	√	√	√	×	考虑了水的全生命周期	侧重于造成的环境影响	√

水资源短缺的次生影响指由于水量短缺和水质恶化的初级影响引起的生态、社会和经济产品与服务的损失,如由缺水引起的生态系统服务、粮食和能源安全、人类健康和依赖水的经济活动受到损害。水资源可持续性评价方法多是综合各领域指标,其中生命周期评价方法(life cycle assessment, LCA)被广泛使用。Boulay 等^[58]结合水分胁迫指数、LCA和人类发展指数,评价了水质下降和水资源数量减少引起的粮食减产共同对人类福祉的影响。

《水足迹手册》将“影响评价”改称为“水资源可持续性评价”,后者更好地反映了水资源管理的内涵^[10]。评价方法主要分为3类:指标评价法、与水生命周期相关的产品可持续性评价方法和综合评价法。在指标评价方法方面,环境绩效指数(environmental performance index, EPI)^[59]综合了水资源、森林资源和废弃物等不同领域;国内生产总值和净国民生产总值衡量社会和经济可持续性;幸福指数(well-being

index)^[60]由人类健康指数(human well-being index, HWI)和生态系统健康指数(ecosystem well-being index, EWI)2部分组成,HWI涵盖人口、财富、知识、文化和公平问题,EWI汇总了水、土地等资源利用指标。与水生命周期相关的产品可持续性评价方法,重点在于度量生产和服务的能量流与物质流,评估水资源整个生命周期中的使用和造成的环境影响,较少涉及社会和经济维度,常用的方法有生命周期评价法(LCA)^[61]、生命周期成本计算法(life cycle cost, LCC)^[62]、产品物质流分析^[63]和产品能量流分析^[64]。综合评价方法通常是跨学科的,如复杂问题情景下系统动力学模型^[65],涵盖社会、经济、环境和政策等方面的压力-状态-响应模型^[63]等。另外还有水资源脆弱性评价方法,它耦合了社会、经济和环境维度,目的在于确定人与环境系统对驱动力变化的敏感性和弹性^[66]。

水足迹概念为社会、经济和环境可持续发展提

供了新思路,并提供了与水相关政策的制定与实施依据。Xu 等^[67]研究发现,1986—2010 年中国的华北平原农业总水足迹增加,提出通过使用高效节水灌溉系统提高用水效率,重点关注肥料施用以减少灰水足迹,而非依赖水利工程来满足更多的水资源需求,这为农业发展、保障国家粮食安全和提高人民福祉提供了决策依据;Xu 等^[68]在共享社会经济路径情景下预测了中国总水足迹到 2050 年将显著增加,东部省份水足迹增加将高达 100%~130%,而西部省份略有减少,据此调整社会经济和水资源管理政策,以应对未来更严重的水资源短缺和地区分配不平衡等问题;Hogeboom 等^[69]根据水足迹概念制定水资源可持续框架,探讨社会企业等投资者将水资源可持续性标准纳入投资决策,评估其对社会-经济-环境可持续发展的影响。

4 目前水足迹研究存在的主要问题及未来研究展望

4.1 问题与挑战

1) 水足迹核算方法及支持数据方面的局限。水足迹核算方法受到数据可获取性的限制,如农业灰水足迹因数据可获取性较差的原因较难计算,目前研究多计算氮肥施用对水环境的影响,但实际上因农药及肥料的施用引起的灰水足迹要远大于核算结果;生产和供应链数据不足导致能源水足迹核算难度增大,并且需水量与真实用水量之间存在差异,估算过程的复杂性及多部门叠加造成的偏差都会影响水足迹核算的精度;水利设施数据不足导致无法评估是“物理缺水”还是“经济缺水”;采用每隔 5 年发布一次的产品投入产出表数据给核算带来滞后性。另外,虽然环境需水量已被纳入核算范围,但其计算大多是假设环境需水量占河流流量的固定百分比^[83],实际上环境需水量由于地域和季节的不同均会产生差异,如何测量或模拟区域的环境需水量尚待完善。水足迹核算结果的可靠性和精度是进行可持续性评价和制定响应政策的基础,从数据获取与预处理、模型参数率定和改进模型方法 3 个方面进一步提升水足迹核算模型的精度十分必要。

2) 水足迹核算的时空尺度与水资源实际利用尺度的不匹配。水足迹核算具有多种时空尺度。就时间尺度而言,年际尺度的研究难以反映出季节性缺水问题。另外,研究的时间范围对结论也会造成影响,气候短期波动或长期变化、社会经济发展都会影响水资源的数量和分配。就空间尺度而言,水资源因其流动性及存在形式多样性(如虚拟水)的特

点,水足迹核算难以选定唯一的空间尺度。另外,不同空间尺度研究的水资源使用量的上限难以达成共识,空间尺度的选择也与政策有关。根据研究对象和目标选择适合的时空尺度,有助于深入理解水资源分配与利用状况,并据此制定出合理的应对策略。

3) 绿水足迹和灰水足迹的核算及影响评估。目前绿水足迹核算广泛应用于国内外农作物种植方向,而生产用途的林木、牧草和市政及娱乐用途的绿地产生的绿水足迹大多被忽略,如在城市地区景观用水在总水足迹中占比不可小觑。目前灰水足迹核算方法尚待完善,水体自净能力较少被纳入考虑范畴,水体污染物选取也较为单一,多种污染物相互作用是否会产生更大的灰水足迹也需进一步探索。拓宽绿水足迹核算范围,并将水污染领域的研究指标与方法纳入水足迹核算体系,是未来的研究方向之一。

4) 水资源分配的公平性问题。人均水足迹在国家间和地区存在巨大差异,如美国人均水足迹是全球人均水足迹的 2 倍,反映了有限的水资源在使用过程中存在国家之间的公平性问题。地区之间因其地域和气候特点造成的水资源可用量差异难以避免,但政策和经济发展程度等因素也造成了水资源使用量差异,经济发达地区因其经济体量庞大,资源使用量和污染排放量均大于欠发达地区,水足迹也远超欠发达地区,这是水资源利用造成公平性问题的另一种表现。全球为应对环境问题提出的减排目标,在一定程度上降低了碳足迹与水足迹,但经济发达地区向欠发达地区的生产转移,给被转移地区造成了巨大的环境负担,并且全球碳足迹与水足迹总量并未实际大幅减少,这是水资源利用公平性问题的又一体现。如何解决水资源分配的公平性问题,仍是政策制定的盲点和重要挑战。

4.2 未来研究展望

1) 食品-能源-水-生态系统服务系统关联研究。食品、能源和水是人类生存和发展所必需的战略资源,水足迹与生态系统服务(供给服务、调节服务、支持服务、文化服务)关系密切。基于系统视角,食品、能源、水和其他生态系统服务构成相互联系和相互作用的关联系统。可持续性评价需要考虑多种组分间的复杂相互作用,食品-能源-水-生态系统服务系统关联研究避免了之前水足迹研究中孤立的考虑单个组分,而是通过水足迹将各个组分密切的连接起来,采用系统关联分析方法,考察在满足人类福祉的同时,如何尽可能减少各子系统之间不必要的权衡,促进系统协同和整体效率与效益的发挥,从而

有效地管理资源以实现可持续发展。目前食品-能源-水-生态系统服务系统关联理论与方法研究仍处于起步阶段,将其他生态系统服务纳入整个系统的研究更少,需要开展多学科和跨学科的综合研究,在大量案例研究的基础上取得突破;此外还迫切需要国家和地区之间的协作与配合,建立必要的贸易补偿机制才能实现水资源可持续利用的目标。

2)利用“环境足迹族”指标评价人与环境系统的环境可持续性维度。人与环境系统可持续性包括社会、经济和环境维度,其中环境可持续性是社会和经济可持续性的基础。环境足迹族包括生态足迹、水足迹、碳足迹、氮足迹、磷足迹、土地足迹、能源足迹等^[70],它们的共同特点在于量化了人类对自然资源的占用和利用量,可以综合评价人与环境耦合系统的环境可持续性维度。环境足迹族的概念有利于解决针对单一资源而忽略其他资源的问题,考虑各类资源利用对环境的影响,对实现区域可持续发展具有特殊重要意义。因此,将社会和经济发展的环境影响纳入“足迹族”评价中^[71],是兼顾可持续发展——社会、经济和环境综合发展的一种新的研究思路和方向。

综上所述,尽管现有的研究还存在一系列问题与挑战,但水足迹核算,尤其食品-能源-水-其他生态系统服务系统关联理论与方法,可为满足人类福祉、减少资源利用之间的权衡、促进彼此之间的协同,以及促进区域可持续发展提供重要的科学技术支撑。

5 参考文献

- [1] LEWIS S L, MASLIN M A. Defining the anthropocene[J]. *Nature*, 2015, 519(7542): 171
- [2] United Nations department of economic and social affairs. Urban and rural population growth and world urbanization prospects[M]//UN DESA: World Urbanization Prospects: the 2018 Revision, 2019: 9
- [3] KIERSCH B. Land use impacts on water resources: a literature review[J]. Land and Water Development Division, FAO, Rome, 2000: 1
- [4] SCHAEFFER R, SZKLO A S, PEREIRA DE LUCENA A PF, et al. Energy sector vulnerability to climate change: a review[J]. *Energy*, 2012, 38(1): 1
- [5] RISKS G. World economic forum: Insight Report[M/OL]. 10th ed. [2020-03-10] http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15
- [6] PROGRAMME U N D. Beyond scarcity: power, poverty and the global water crisis[M]. New York: Palgrave Macmillan, 2006: 1
- [7] CARR G M, NEARY J P. Water quality for ecosystem and human health[M]. Nairobi: UNEP/Earthprint, 2008
- [8] ALLAN J A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits[J]. *Groundwater*, 1998, 36(4): 545
- [9] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual water Trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, value of water research series no. 11[M]. Delft, the Netherlands: IHE, 2002: 15
- [10] ALDAYA M M. The water footprint assessment manual[M]. London: Routledge, 2012
- [11] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, delft, the netherlands, 12-13 december 2002, value of water research report series no. 12[C]. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE, 2003
- [12] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(9): 3232
- [13] VANHAM D, BIDOGLIO G. The water footprint of agricultural products in European river basins[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064007
- [14] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. *Water Resources and Management*. 2007, 21(1): 35
- [15] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. The water footprints of morocco and the netherlands: global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities[J]. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 143
- [16] FALKENMARK M. Land-water linkages: a synopsis[J]. *FAO land and water bulletin*, 1995, 1: 15
- [17] FALKENMARK M, LANNERSTAD M. Consumptive water use to feed humanity - curing a blind spot[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(1/2): 15
- [18] ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 472
- [19] HOFF H. Understanding the nexus: background paper for the Bonn 2011 Conference[C]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011
- [20] MOSS B. Water pollution by agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 659
- [21] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109
- [22] SMITH M, CROPW A T: A computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food & Agriculture Org, 1992
- [23] CLARKE D, SMITH M, EL-ASKARI K. Cropwat for windows: user guide[C]. Netherlands: IHE, 2000
- [24] LIU J G, WILLIAMS J R, ZEHNDER A J B, et al.

- GEPIIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 94(2): 478
- [25] WILLIAMS J. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 2. user manual[M]. USDA: Agricultural Research Service, 1990
- [26] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. Aquacrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 426
- [27] LIU J G, YANG H. Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: Green and blue water[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3/4): 187
- [28] 薛冰, 董书恒, 黄裕普, 等. 1980—2016年辽宁省主要粮食作物生产水足迹时空演变特征[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2813
- [29] TUNINETTI M, TAMEA S, D'ODORICO P, et al. Global sensitivity of high-resolution estimates of crop water footprint[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(10): 8257
- [30] 孙世坤, 王玉宝, 刘静, 等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(9): 1115
- [31] 王杰, 龙爱华, 杨广, 等. 近25a来新疆农作物水足迹与经济增长的空间关系分析[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(3): 526
- [32] DAVIES E G R, KYLE P, EDMONDS J A. An integrated assessment of global and regional water demands for electricity generation to 2095[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 52: 296
- [33] SCHEWEJ, HEINKEJ, GERTEND, et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3245
- [34] DING N, LIU J R, YANG J X, et al. Water footprints of energy sources in China: exploring options to improve water efficiency[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1021
- [35] 赵俊. 能源发展战略行动计划(2014—2020年)[J]. *气体分离*, 2014, (6): 58
- [36] PEÑA C A, HUIJBREGTS M A J. The blue water footprint of primary copper production in northern Chile[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(1): 49
- [37] GU Y F, XU J, KELLER A A, et al. Calculation of water footprint of the iron and steel industry: a case study in Eastern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 92: 274
- [38] 丁宁, 逮馨华, 杨建新, 等. 煤炭生产的水足迹评价研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(11): 4228
- [39] WANG S G, CAO T, CHEN B. Urban energy-water nexus based on modified input-output analysis[J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 208
- [40] XU Z C, LI Y J, HERZBERGER A, et al. Interactive national virtual water-energy nexus networks[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 128
- [41] 关伟, 赵湘宁, 许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系[J]. *资源科学*, 2019, 41(11): 2008
- [42] MAASS A. Design of water-resource systems, new techniques for relating economic objectives, engineering analysis, and governmental planning[J]. *American Economic Review*, 1962, 52(5): 1188
- [43] VANHAM D. Does the water footprint concept provide relevant information to address the water-food-energy-ecosystem nexus[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 298
- [44] DALE L L, KARALI N, MILLSTEIN D, et al. An integrated assessment of water-energy and climate change in sacramento, california: how strong is the nexus?[J]. *Climatic Change*, 2015, 132(2): 223
- [45] DAHER B T, MOHTAR R H. Water-energy-food (WEF) nexus tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making[J]. *Water International*, 2015, 40(5/6): 748
- [46] RAMASWAMI A, BOYER D, NAGPURE A S, et al. An urban systems framework to assess the trans-boundary food-energy-water nexus: implementation in Delhi, India[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(2): 025008
- [47] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真[J]. *管理评论*, 2016, 28(10): 11
- [48] HAN D N, YU D Y, CAO Q. Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119379
- [49] MAYS L W. *Water resources sustainability*[M]. New York: McGraw-Hill, 2007
- [50] FALKENMARK M, LUNDQVIST J, WIDSTRAND C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development [J]. *Natural Resources Forum*, 1989, 13(4): 258
- [51] VÖRÖSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284
- [52] SULLIVAN C. Calculating a water poverty index[J]. *World Development*, 2002, 30(7): 1195
- [53] KARABULUT A, EGOH B N, LANZANOVA D, et al. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 278
- [54] 刘静, 余钟波. 基于水足迹理论的中国水资源压力评价[J]. *水资源保护*, 2019, 35(5): 35
- [55] ROCKSTRÖM J, FALKENMARK M, KARLBERG L, et al. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): W00A12
- [56] ZENG Z, LIU J G, SAVENIJE H H G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 441
- [57] LIU J G, LIU Q Y, YANG H. Assessing water scarcity by simul-

- taneously considering environmental flow requirements, water quantity, and water quality[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 434
- [58] BOULAY A M, BULLE C, BAYART J B, et al. Regional characterization of freshwater use in LCA; modeling direct impacts on human health[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(20): 8948
- [59] HSU A, ZOMER A. Environmental performance index[J]. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 2014: 1
- [60] PRESCOTT-ALLEN R. The wellbeing of nations[M]. [S. l.]: Island Press, 2001
- [61] CHRISTIANSEN K, HOFFMAN L, VIRTANEN Y, et al. Nordic guidelines on life-cycle assessment[M]. [S. l.]: Nordic Council of Ministers, 1995
- [62] GLUCH P, BAUMANN H. The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making[J]. *Building and Environment*, 2004, 39(5): 571
- [63] SPANGENBERG J H, FEMIA A, HINTERBERGER F, et al. Material flow-based indicators in environmental reporting[J]. *Environmental Issues Series*, 1999(14): 6
- [64] HERENDEEN R A. Energy analysis and EMERGY analysis: a comparison[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1/2): 227
- [65] CAULFIELD C W, MAJ S P. A case for systems thinking and system dynamics[C]// 2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace (Cat. No. 01CH37236). October 7-10, 2001, Tucson, AZ, USA. IEEE, 2001: 2793
- [66] TURNER B L, KASPERSON R E, MATSON P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8074
- [67] XU Z C, CHEN X Z, WU S R, et al. Spatial-temporal assessment of water footprint, water scarcity and crop water productivity in a major crop production region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224: 375
- [68] XU X C, ZHANG Y Y, CHEN Y M. Projecting China's future water footprint under the shared socio-economic pathways[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110102
- [69] HOGEBROOM R J, KAMPHUIS I, HOEKSTRA A Y. Water sustainability of investors: development and application of an assessment framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 642
- [70] GALLIA, WIEDMANNT, ERCINE, et al. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "footprint family" of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100
- [71] ČUČEK L, KLEMEŠ J J, KRAVANJA Z. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 34: 9

Water footprint and water resource sustainability-recent progresses

DING Tiancong YU Deyong[†]

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Faculty of Geographical Science, 100875, Beijing, China)

Abstract Water is a scarce strategic resource for human survival and economic development, its rational allocations and utilizations have become important to promote regional sustainable development. Impact of climate changes and human activities on spatial and temporal distribution and sustainable use of water resources is in an increasing trend. Water footprint and accounting could be effective to quantify water volume required for products and services, to measure social, economic and environmental impacts of water withdrawal, and to assess the sustainability of water resources. Major findings and achievements in the field of water footprint research are summarized here. The concept and development of water footprint were described. Methods for calculating water footprint, interactions between energy, food and water resources were discussed in the framework of food-energy-water nexus. It was emphasized that future water footprint research should focus on food-energy-water nexus. The "environmental footprint family (including water, ecology, energy, carbon, land, nitrogen, and phosphorus footprints)" indicators were summarized to evaluate comprehensive performance of human-environment coupling system, to explore the resource utilization schemes that reduce environmental footprint but meet human needs.

Keywords water resources; food-energy-water nexus; sustainability; human well-being; environmental footprint

【责任编辑: 刘先勤】