

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.004

面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法

陈莎¹, 吕鹤¹, 李素梅¹, 刘影影¹, 张雅娜¹, 王宏涛², 宋向东²

(1. 北京工业大学环境科学系, 北京 100124; 2. 中国质量认证中心, 北京 100070)

摘要:从概念和方法演变的视角总结分析了目前基于水足迹网络(WFN)和基于生命周期评价(LCA)的两种主要水足迹评价(WFA)方法,并系统比较了二者的差异与联系。在此基础上,以解决水资源的可持续利用为根本目标,提出了服务多用户、面向多目标、覆盖全过程的综合水足迹评价方法。该评价方法体现了生命周期思想,又具有系统性,同时强调了不同利益相关者参与的作用;能够从提升资源使用效率、减少环境影响以及资源总量控制多个维度开展不同层面的水足迹评价,可为制定微观和宏观层面统一的水资源可持续利用决策方案、管理方法提供更为全面的理论与技术支撑。

关键词:水资源可持续利用;水足迹;水足迹评价;生命周期评价

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0022-07

Methods of comprehensive water footprint assessment for sustainable utilization of water resources//CHEN Sha¹, LYU He¹, LI Sumei¹, LIU Yingying¹, ZHANG Yana¹, WANG Hongtao², SONG Xiangdong² (1. Department of Environmental Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Quality Certification Center, Beijing 100070, China)

Abstract: Based on the perspective of concepts and method evolution, two major water footprint assessment (WFA) methods of water footprint network (WFN) and life cycle assessment (LCA) are compared and analyzed, their correlation and differences between each other are summarized. On this basis, a comprehensive water footprint assessment method for multi-user service, multi-objective and whole-process coverage is proposed to solve the sustainable utilization of water resources. The assessment method embodies the idea of life cycle and is systematic, thus overcoming the limitations of different methods. At the same time, it emphasizes the role of participation of various stakeholders. Water footprint assessment can be carried out at different levels from improving the efficiency of resource use, reducing environmental impacts and controlling the total amount of resources, providing a more comprehensive theoretical and technical support for formulating the decision-making scheme and management method of water resources sustainable utilization at both micro and macro levels.

Key words: sustainable utilization of water resources; water footprint; water footprint assessment; life cycle assessment

水资源全球分布不均,加之人口增长、气候变化等因素,世界许多地区水资源短缺问题愈发严重^[1]。农业种植、工业生产和人类生活对水资源需求的不断增加不仅加剧了水量的短缺,而且造成了水质不断恶化。水污染对未来水资源的供应可能会产生巨大威胁^[2]。水资源短缺和水污染已成为全球水资源可持续利用面临的主要挑战^[3]。为实现水资源的可持续利用,保障经济与社会的可持续发展,制定一个完善的评价方法和指标体系来评估水

资源消耗、水质污染和水资源的可持续性尤为重要。

2002年Hoekstra^[4]在虚拟水理论上提出了水足迹概念。水足迹指任何已知人口(国家、地区或个人)在一定时间内消耗的所有产品和服务所需要的水资源数量,是衡量水消耗和水污染的综合指标。区别于以往水资源以取水量研究为核心,水足迹不仅确定了消费者或生产者的直接用水,也确定了间接用水;既可应用于微观产品水平,也可用于流域、地区或国家等宏观区域水平。水足迹揭开了水

基金项目:国家重点研发计划(2018YFF0215700)

作者简介:陈莎(1968—),女,教授,博士,主要从事能源水足迹与低碳减排等研究。E-mail: chensha@bjut.edu.cn.

资源与产品生产和消费之间的联系,这一概念应用范围的广泛性和研究角度的开放性使其拥有良好的开发与改进空间。随后水足迹网络(water footprint network, WFN)开发了以量化供应链中直接用水与间接用水为基础,以评价水资源可持续利用为目标的水足迹评价(water footprint assessment, WFA)^[5]。

随着水足迹研究与应用的不断深入,基于生命周期评价(life cycle assessment, LCA)的研究方法被提出并完善^[6]。基于生命周期评价的水足迹评价(LCA-WFA)考虑了一系列与水相关的潜在环境影响,采用传统 LCA 模型评估水质影响,并不断开发针对水量影响的评价模型^[7]。经过多年发展,国际标准化组织于 2014 年制定了 LCA-WFA 国际标准 ISO 14046,该准则提出了评价水消耗与污染的要求。随后,对关于如何应用该标准又建立了补充说明性文件 ISO/TR 14073,包括水足迹评价在不同产品中的应用性举例,且每年进行更新说明。生命周期用水评价小组(WULCA)之后基于剩余可用水量建立了更加符合水文意义的 AWARE 模型,并推荐与生命周期相关的研究采用该协商一致的模型以解决多种模型间量化结果不具备可比性的问题^[8]。

在 WFN-WFA(基于水足迹网络的水足迹评价)和 LCA-WFA 两种评价方法中,水足迹代表不同的含义。在 WFN-WFA 中,水足迹以水资源管理为重点,主要目标是促进流域内水资源的公平和可持续使用,以耗水体积为指标;而 LCA-WFA 主要目标是通过量化水资源使用过程中产生的潜在环境影响,从而优化产品,寻求降低影响改进产品系统的新技术,以环境影响为指标。WFN-WFA 和 LCA-WFA 的评价方法局限于单一评价体系内开展,忽略了可持续水资源管理中的一些问题。但二者的根本目标都是保护水资源,实现水资源的可持续利用,是在形式上遵循特定步骤、内容相互补充的两种评价模式。两种评价方法都认为应该从供应链或生命周期的角度开展水足迹评价^[9]。根本目标的一致性和量化方法的互补性,使综合两种评价方法成为可能。黄凯等^[10]对水足迹定量核算的模型与方法进行了比较,阐述了水足迹理论的应用进展。刘静等^[11]为实现水资源可持续利用,在明晰中国蓝水足迹和灰水足迹空间分布规律的基础上,提出了涵盖水量和水质的水资源压力指数计算方法,并对中国各省级行政区水资源压力状况进行了评价。孙克等^[12]采用引力模型构建了中国省域灰水足迹的空间关联网,应用社会网络分析法,对省域水污染的空间关联网结构特征及其效应进行了分析。任晓晶等^[13]以乳制品企业为例,探索了 WFN-WFA 和 LCA-WFA

在实际应用中的优缺点和适用范围。陈岩等^[14]运用灰水足迹效率测算模型对淮河流域 35 个地级市的农业灰水足迹效率进行了测度和时空分布研究。韩宇平等^[15]为量化冬小麦对水资源的消耗、合理利用区域水资源,基于彭曼公式、日尺度土壤水量平衡与通径分析法核算了 1958—2016 年海河流域冬小麦水足迹,分析了气象、农业生产投入因素对冬小麦水足迹的直接和间接影响。刘静等^[16]在量化江苏省农业生产水足迹、消费水足迹及虚拟水流动基础上,分析了与水资源消耗相关的环境影响,以及对人类健康、生态质量及资源的影响。这些研究凸显了不同方法在解决适当问题时的优势。综合使用水足迹评价方法能为决策者提供互补的管理决策,有助于更加全面的水资源保护措施的制定。

目前综合使用两种方法开展的水足迹研究多面向产品且以对比结果为主,没有明确针对水资源可持续利用的水足迹评价方法。本文分析 WFN-WFA 和 LCA-WFA 两种方法各阶段的重点,明确不同方法对水资源可持续管理的作用,并建立综合水足迹评价框架,确定综合评价步骤,给出量化方法和评价指标适用范围,最后综合分析该评价方法的应用前景。

1 WFN-WFA 和 LCA-WFA 的比较

有关 WFN-WFA 和 LCA-WFA 的比较见表 1。通过比较,发现两种评价体系在结构与内容上有很多相似之处。二者起始阶段都以定量核算产品或单元过程耗水量为开端。LCA-WFA 通过量化产品内部单元流程耗水量产生的环境影响向微观层面开展研究,为优化产品系统提供决策信息;WFN-WFA 通过将量化的产品耗水量应用于区域等水文地理级别向宏观层面开展研究,为流域内水资源管理提供决策信息。LCA-WFA 从生命周期角度强调了产品与产品间的联系,生产某一产品消耗的直接用水相对于其他产品是间接用水;WFN-WFA 从供应链角度强调了产品在区域间的联系,一地区生产商品消耗的实体水相对于其他区域为虚拟水。以产品为核心,行业间不同产品的间接用水与地区间的虚拟水转移使产品、行业和区域成为一个整体嵌套系统。说明两种方法在目标与范围的确定上是有机统一的,不同方法可以根据目标的不同在整个系统中划定系统边界,然后开展微观层面或宏观层面的水足迹评价。

两种方法的不同主要是步骤二中衡量水消耗与污染程度的术语和步骤三中如何使用量化后的耗水量。WFN-WFA 采用根据水文学和相对简化的水资

表1 WFN-WFA 和 LCA-WFA 各阶段内容比较

Table 1 Content comparison at various stages of WFN-WFA and LCA-WFA

阶段	WFN-WFA	阶段	LCA-WFA
设定目标和范围	①选定热点地区(水资源匮乏地区),确定地理边界;②从供应链角度识别产品系统边界;③量化(区域、产品)耗水量	目标和范围的确定	①依据生命周期思想划定详细的产品系统边界;②量化特定区域具体产品或单元过程的潜在环境影响
水足迹核算	①同时考虑淡水消耗与污染问题;②将水足迹分为蓝水、绿水、灰水足迹;③以总水足迹反映产品水消耗量	清单分析	①对淡水资源的消耗和污染问题分别开展研究;②根据来源和用途确定水资源类型;③核算地表水、地下水、降水以及污染物排放量
水足迹可持续评价	①对区域蓝水和绿水开展稀缺性评价(基于消耗与可用性之比);②需要考虑区域内所有产品或单元过程的水资源消耗信息以及区域总水量	影响评价	①采用中点和终点指标分别量化水资源消耗和污染造成的环境影响;②评价不同产品之间的环境影响;③评价同一产品不同单元过程的环境影响
制定响应方案	①制定降低水足迹方案;②促进生产者采取措施减少水足迹,消费者选择水足迹较低的产品	结果解释	①寻求降低产品系统环境影响的优化方案;②促进生产者选择环境影响较低的原材料开展生产

源循环模式为基础创立的三色水足迹开展评价,以实体水量直观反应水资源消耗与污染程度,使公众意识到水资源在生活中的重要性,有助于生产部门与决策者之间进行积极沟通。而 LCA-WFA 采用符合水文规律和原则的术语以加权的方法开展评价,致力于建立各组织间通用一致的评价体系。

在水资源量化阶段,早期 WFN-WFA 中蓝水足迹未考虑水资源类型,以总量反映用水情况^[17]。然而不同来源的蓝水足迹对环境会产生不同的潜在影响^[18]。随后采用 WFN-WFA 方法的研究也开始对不同组分的蓝水加以区分^[19]。LCA-WFA 在影响评价阶段大多采用基于长期平均数据的影响因子量化水资源稀缺性^[20]。而在量化农产品种植过程中的耗水量时,由于农业年用水总量取决于气候和作物类型,二者又受时间与地理位置影响,因此不考虑季节、降水量的变化将掩盖不同时间段高耗水量与低耗水量对淡水资源影响产生的差异,降低评价结果的实用性。而 WFN-WFA 通过在水资源量化阶段纳入时空差异分析,采用高时空分辨率的月度耗水量开展评价,能够在很大程度上降低平均值带来的影响。水足迹量化与影响评价之间的时空一致性至关重要,为此 LCA 方法在制定淡水稀缺性影响因子时也采用了耗水量与可用性之比,同时将时间、空间的变化作为考量因素之一。LCA 方法也采用绿水足迹概念,量化绿水在土壤与大气层上的变化对生态系统和自然资源的影响。

部分学者认为,WFN-WFA 忽略了水消耗对水资源和生态系统的潜在影响。虽然采用 WFN-WFA 方法开展的水足迹研究大多停留在水足迹核算阶段,但量化得到的三色水足迹能够很好地应用于产品或区域级的水量评价,这在 LCA 方法中没有得到足够重视。Hoekstra^[21]也指出虽然 WFN 提出的方法具有很好的兼容性,然而试图用一种方法解决水资源中的所有问题是不切实际的,因为不同角度的

水足迹研究关注不同的问题。不同的方法应放入适当领域展开讨论与研究,这样才能扬长避短,发挥出实际价值。此外,水量评价与影响评价存在共性,都受效率思维模式影响。在解决水资源短缺问题上,水量评价强调直接减少用水量,影响评价同样通过减少资源消耗量间接达到降低环境影响的目的。这两种评价方法对水资源管理同样重要,如一种高耗水量的产品不能因为在当地耗水产生的环境影响较低就不对其开展水资源管理。水量评价能为提升产品或区域水效率提出建议,因此水量评价也应是水资源可持续利用综合评价中的重要一环,实施者应综合两种评价结果以制定更加合理的响应方案。

当前水资源可持续评价方法不够完善,缺乏足够的信息来支持政策分析。而水资源的可持续利用已经成为区域发展与企业生产的重要制约因素,单一水足迹评价方法不足以为制定水资源可持续利用方案提供全面的建议。如今人们虽然认识到了水资源的稀缺性,但很多地区仍然坚持把水资源当作是丰富的公共资源来使用。若决策继续以经济为导向而忽视环境污染与资源耗竭,将导致严重的生态危机。从供应链角度出发考量水资源在国家或地区间的联系,能在宏观上拓展传统水资源管理模式,因此将水的影响纳入优化区域或全球供应链的决策建议中是必要的。

2 综合水足迹评价方法

2.1 框架的建立

水资源可持续利用应同时考虑水量、水质与效益,为此笔者在以上对比分析 WFN-WFA 和 LCA-WFA 的基础上,结合二者优点建立了面向水资源可持续利用的综合水足迹评价(sustainable use of water resources-water footprint assessment, SUWR-WFA)框架如图1所示。该方法前两个阶段为目标和范围的确定和清单分析,与 WFN-WFA 和 LCA-WFA 前两

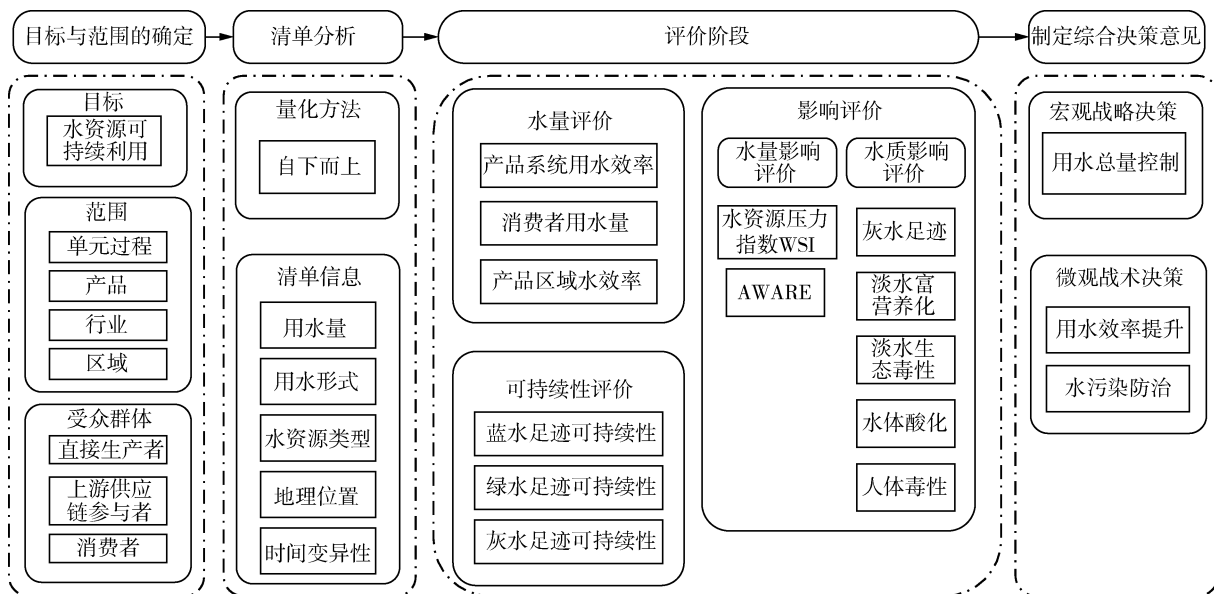


图1 面向水资源可持续利用的综合水足迹评价框架

Fig.1 Framework of sustainable use of water resources-water footprint assessment

个阶段类似,但是有着不同的层面区分;评价阶段包括水量评价、影响评价和可持续评价3个模块,最终根据3种不同评价结果提出综合决策意见。

2.2 目标与范围的确定

面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法的目标与范围以产品为核心,逐步扩展至区域,分为微观和宏观两个层面。评价范围包含单元过程、产品、行业和区域。在开展相应评价时将区域与产品看作一个有机的整体。研究目标涉及评价耗水量、环境影响和水资源的可持续性。根据目标确定受众群体(包括直接生产者、上游供应链参与者和消费者),依此确定最终系统边界与功能单元。划分地理边界的原则遵循文献[5],产品系统边界与功能单元的确定遵循ISO 14046中的相应规则。

2.3 清单分析

清单分析主要任务是量化淡水资源的消耗量和污染物排放量。现阶段已经发展出多种水足迹量化方法,主要分为自下而上和自上而下两类。方法的选择主要依据研究问题的性质、水文系统的复杂性、量化范围等。对于以产品为核心的SUWR-WFA,量化产品耗水量为该阶段的第一步。同时对于不同的方法或模型来说,底层数据的质量至关重要,因此采用自下而上的量化方法。清单分析遵循LCA方法中的原则,农业上通过结合作物水文模型量化耗水量,工业上则采用分布积累法开展水足迹量化工作。由于评价方法中的不同评价模块对数据信息要求不同,因此该阶段水足迹清单应该包括用水量、用水形式、水资源类型、地理位置以及时间变异性。为了使量化结果更加准确且有意义地应用于不同评价模

块,本方法在该阶段采用WFN-WFA中的水足迹概念,但重新确定了该阶段所需量化的水足迹。

WFN-WFA中水足迹量化阶段以蓝水、绿水和灰水简单相加后的数据提供最终结果,但这一过程存在很大争议,且缺乏合理性。首先这一过程忽略了三者之间机会成本与环境影响不同的这一事实;其次蓝(绿)水与灰水性质不同,前两者是实际消耗的水量,而灰水是根据假设模型推算得到的潜在耗水量,有很强的主观因素;最后在水足迹可持续评价中并没有应用这一结果,而是采用不同的指标针对三色水足迹分别开展评价研究,这造成量化阶段与评价阶段缺少关联性。因此在SUWR-WFA中清单分析阶段放弃加和这一步,只核算蓝水、绿水足迹以及相关的污染物排放量,以便量化结果直接关联3类评价,增强方法框架完整性。此外灰水足迹应用稀释体积法,类似于以体积核算为基础,以消耗的清洁水量来表征污染物造成的环境影响。本文采用与Lovarelli等^[22]相同的做法,将其与LCA方法中的水污染中点评价指标平行使用,纳入影响评价阶段,以全面反映水资源污染程度。

2.4 水量评价

SUWR-WFA中水量评价直接使用清单数据,从生产者、消费者和贸易3种不同角度评价产品、行业或特定地理区域的相关用水效率。从生产者角度可以评价产品系统用水效率,通过与现有最佳技术比较以确定提升用水效率的相应改善措施^[23]。从消费者角度来看,用水效率采用传统体积单位衡量个人消耗产品中包含的淡水资源总量的方式使其易被公众理解并接受^[24]。通过提高公众认知,促进消费

者选择低耗水量产品。从贸易角度评价产品生产在区域上的整体用水效率,这将各个国家或地区联系起来,通过在产品生产的上游供应链中选择耗水量更低的原材料以达到各个区域共同提升用水效率^[25]。该评价模块只使用蓝水与绿水足迹,不考虑灰水足迹。水量评价结果直观,模型操作简单,能从生产者与消费者双向考虑二者对提升用水效率的作用。

2.5 影响评价

SUWR-WFA 中该评价模块同时涵盖水量影响评价和水质影响评价。水量影响评价方面选择 LCA-WFA 中的水资源稀缺性评价指标;水质影响评价指标则分为两部分,包括 LCA-WFA 中的水污染评价指标和 WFN-WFA 中的灰水足迹。其中基于 LCA 方法的影响指标采用 Joliet 等^[26]在最新的环境生命周期影响评价指标全球指南中以终端损害为导向的对应人体健康、生态系统质量、自然资源 3 方面的相应中点指标。水量影响评价包括基于取水与可用性的水资源压力指数(water stress index, WSI)和基于消耗与可用性的 AWARE (available water remaining)。已有研究表明 WSI 和 AWARE 应用于实例研究中时,系统边界内部各阶段对潜在影响的贡献具有相似的排名^[27]。作为传统水资源稀缺性评价指标,WSI 已有大量研究,拥有数据基础;而 AWARE 更加符合水文意义,但作为全新方法,其实例研究相对较少。因此水量影响评价同时采用 WSI 和 AWARE 能提高评价结果的准确性。

水质影响评价包括灰水足迹评价,因为其描述了水体吸收污染负荷所需的水量,以耗水量衡量污染最严重的物质给水资源带来的影响。《水足迹评价手册》建议采用 3 层方法量化灰水足迹^[10],规则指出第一层方法简单地使用现有数据,不能描述一种化学物质从土壤表面到地表水或地下水的不同途径,以及不同化学物质之间的相互作用和转化,强调量化结果仅为粗略估计。同时 Franke 等^[28]指出现阶段灰水足迹研究一直基于第一层的方法,且一段时间内在企业和政府的实际应用中情况仍会如此。采用灰水足迹能够直观反映水污染的总体情况。水质影响评价指标也包括 LCA-WFA 中的水污染评价指标,这弥补了灰水足迹评价结果准确性较低的不足。通过这类中点指标能够量化不同污染物产生的环境影响。因此在水质影响评价中同时使用灰水足迹和 LCA 方法中水污染评价指标,能够更全面地反映主要污染物所造成的水污染程度,更清楚地显示水污染状况。模型的选择上灰水足迹采用《水足迹评价手册》中第一层模型;水质影响评价指标则包括 4 类中点指标:淡水富营养化、淡水生态毒性、水

体酸化和人体毒性。

2.6 可持续性评价

可持续性评价定位在区域水平,通过对比系统边界内蓝(绿)(灰)水足迹与区域内可利用水资源总量确定水资源是否可持续,为提高区域内水资源公平分配和可持续利用提出进一步的改善措施。资源型缺水针对蓝水足迹和绿水足迹分别开展评价,水质型缺水采用灰水足迹开展评价。蓝(绿)(灰)水足迹总量等于区域内所有生产生活消耗的蓝(绿)水足迹与产生的灰水足迹。特定时间段内可利用蓝水资源量等于自然净流量减去环境流需求量;可利用绿水资源量为土地中来自降水的蒸散发总量减去该地区自然植被的蒸散量和土地产生的蒸散量中未利用于植物生产的部分;可利用的纳污水资源总量等于流域实际径流量。

SUWR-WFA 中可持续性评价强调供需关系在水资源管理中的作用,区域内所有参与者应共同削减水资源使用量。可持续评价结果将推动研究范围内不同群体采取不同措施:生产者提高自身用水效率,工业部门选择更加节水的生产技术,农业部门采用更高效的灌溉技术。决策者可以制定政策,在满足区域绿水资源可持续的情况下,促使农业生产者种植保持作物多样性和经济价值的作物以更换现有的作物来节约水资源。消费者提升节水意识、改善饮食和生活习惯,选用更低耗水量的产品。此外,可持续性评价提升了水资源管理的层次,使水资源的可持续利用改进措施不仅局限于产品本身。虽然与水相关的影响是局部的,需要在产品、流域水平量化,但也能在全球水平解决区域性问题。产品对环境的总体影响中有很很大一部分通常归因于上游过程,供应链中上游和下游相关利益者应共同参与解决水资源短缺问题。因此,企业可以在战略决策层面选择用水效率高的供应商,降低产品中虚拟水含量,从而提高企业自身的运营用水效率。

2.7 制定综合决策意见

制定综合决策意见旨在为水资源可持续利用提供更全面的建议。通过整合 3 类评价模块可从不同的角度为制定决策提供参考。水量评价为降低产品直接耗水量,影响评价为优化整个产品系统,可持续性评价促进区域内所有关联者进行水资源的公平分配。同时考虑水足迹的水量评价与影响评价,能够帮助实施者在微观层面为产品制定决策时更好地权衡水量与影响之间的关系,避免结果不够全面而对决策者产生误导。在此基础上引入宏观层面的可持续性评价,能够使决策目标统一、方向一致,避免微观战术措施与宏观战略决策出现分歧,最终通过开

展微观和宏观层面的多维决策形成一套全面的水资源管理综合决策意见。再根据意见返回阶段三,提出针对不同评价模块的改进方案,实现水资源的可持续利用。

3 结 语

根据决策过程的自然层次,提出了一套新的水资源可持续利用评价方法。该方法从水量和水质两方面进行整体分析,采用3个评价模块,最后权衡3类评价结果制定涵盖微观层面和宏观层面的多维决策。SUWR-WFA为制定区域水资源可持续利用整体方案提供了理论基础,在实际应用中能在用水效率提升、水污染防治和用水总量控制方面制定合理的解决方案。

参考文献:

- [1] LARSEN T A, HOFFMANN S, LUTHI C, et al. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world [J]. Science, 2016, 352: 928-933.
- [2] MHLONGO S, MATIVENGA P T, MARNEWICK A. Water quality in a mining and water-stressed region [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 446-456.
- [3] 严登华, 王浩, 周梦, 等. 全球治水模式思辨与发展展望 [J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 1-7. (YAN Denghua, WANG Hao, ZHOU Meng, et al. Scientific ideas and development prospects of global water management modes [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 1-7. (in Chinese))
- [4] HOEKSTRA A Y. 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 [R]. Delft: IHE, 2002.
- [5] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M, CHAPAGAIN A K. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.
- [6] KOEHLER A. Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(6): 451-455.
- [7] BERGER M, FINKBEINER M. Water footprinting: how to address water use in life cycle assessment? [J]. Sustainability, 2010, 2(4): 919-944.
- [8] BOULAY A, BARE J, BENINI L, et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE) [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 23(2): 368-378.
- [9] BLACKHURST M, HENDRICKSON C, VIDAL J S I. Direct and indirect water withdrawals for US industrial sectors [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(6): 2126-2130.
- [10] 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 Ziyuan, YANG Shunshun, et al. Theory, calculation method and application progress of water footprint [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2013, 33(4): 78-83. (in Chinese))
- [11] 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): 35-39. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water resources pressure assessment in China based on water footprint theory [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 35-39. (in Chinese))
- [12] 孙克, 聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析 [J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 29-36. (SUN Ke, NIE Jian. Spatial correlation network analysis of provincial grey water footprint based on gravity model [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 29-36. (in Chinese))
- [13] 任晓晶, 白雪, 刘丹, 等. 水足迹评价方法对比及案例研究 [J]. 水利经济, 2018, 36(6): 14-19. (REN Xiaojing, BAI Xue, LIU Dan, et al. Comparison and case study of assessment methods for water footprints [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6): 14-19. (in Chinese))
- [14] 陈岩, 童国平, 王蕾. 淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式 [J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 60-66. (CHEN Yan, TONG Guoping, WANG Lei. Spatial-temporal distribution and driving models of agricultural grey water footprint efficiency in the Huai River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 60-66. (in Chinese))
- [15] 韩宇平, 贾冬冬, 黄会平, 等. 基于通径分析的海河流域冬小麦水足迹及影响因素 [J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 6-13. (HAN Yuping, JIA Dongdong, HUANG Huiping, et al. Water footprint of winter wheat and its influencing factors in Haihe River Basin based on path analysis [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 6-13. (in Chinese))
- [16] 刘静, 余钟波. 江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 320-326. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 320-326. (in Chinese))
- [17] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [18] MARSTON L, AO Y, KONAR M, et al. High-resolution water footprints of production of the united states [J].

- Water Resources Research, 2018, 54(3): 2288-2316.
- [19] ZHUO L, HOEKSTRA A Y, WU P, et al. Monthly blue water footprint caps in a river basin to achieve sustainable water consumption; the role of reservoirs [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650(1): 891-899.
- [20] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(11): 4098-4104.
- [21] HOEKSTRA A Y. Water footprint assessment: evolution of a new research field [J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3061-3081.
- [22] LOVARELLI D, INGRAO C, FIALA M, et al. Beyond the water footprint: a new framework proposal to assess freshwater environmental impact and consumption [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 4189-4199.
- [23] CHUKALLA A D, KROL M S, HOEKSTRA A Y. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(12): 4877-4891.
- [24] ERCIN A E, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Sustainability of national consumption from a water resources perspective: the case study for France [J]. Ecological Economics, 2013, 88: 133-147.
- [25] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, van OEL P R. Progress in water footprint assessment: towards collective action in water governance [J]. Water, 2019, 11: 10705.
- [26] JOLLIET O, ANTON A, BOULAY A, et al. Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 23(11): 2189-2207.
- [27] PAYEN S, FALCONER S, LEDGARD S F. Water scarcity footprint of dairy milk production in New Zealand: a comparison of methods and spatio-temporal resolution [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 504-515.
- [28] FRANKE N A, HOEKSTRA A Y, BOYACIOGLU H. Grey water footprint accounting: tier 1 supporting guidelines [M]. Delft: Institute for Water Education, 2013.
- (收稿日期: 2020-08-08 编辑: 彭桃英)
- +++++
- (上接第 21 页)
- [48] RAHEEM N, CRAVENS A E, CROSS M S, et al. Planning for ecological drought: integrating ecosystem services and vulnerability assessment [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2019, 6(4): e1352.
- [49] JORDAAN A, BAHTA Y T, PHATUDI-MPHAHLELE B. Ecological vulnerability indicators to drought: case of communal farmers in Eastern Cape, South Africa [J]. Jamba, 2019, 11(1): 591.
- [50] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 36-45. (in Chinese))
- [51] 王卫光, 黄茵, 邢万秋, 等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析 [J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 8-13. (in Chinese))
- (收稿日期: 2020-10-29 编辑: 彭桃英)
- +++++

· 征订启事 ·

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV) 是水利部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊, 针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题, 探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题, 主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985 年创刊, 经过 30 多年的努力, 《水资源保护》办刊成绩斐然, 目前是美国《工程索引》(EI) 收录期刊、中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊, 同时被美国化学文摘 (CA)、波兰哥白尼索引 (IC) 等数据库收录。

《水资源保护》长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊, 是国内较有影响的水利期刊之一, 主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊, 30 元/册, 全年共计 180 元, 每逢单月 20 日出版。邮发代号: 28-298。

地址: 210098 南京市西康路 1 号 电话: (025) 83786642

电子信箱: bh1985@vip. 163. com; bh@hhu. edu. cn