

# Research Progress on Water Footprint Assessment

Zeliang Dong, Xianhui Pan\*, Jing You, Zongyu Li, Jianmei Wu

The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR (Tianjin), Tianjin  
Email: \*xianhuiipan@123.com

Received: May 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2019; published: May 31<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

Water footprint assessment is a new technology to measure the impact of human activities on water resources, and it will help people to use water resources scientifically and reasonably. In the paper, the utilization status of water resources is analyzed briefly. The method of water footprint assessment is summarized based on life cycle assessment theory. The research status of water footprint theory and its application is reviewed. The important field of water footprint research in the future is suggested.

## Keywords

Water Resources, Water Footprint, Life Cycle, Assessment

---

# 水足迹评价研究进展

董泽亮, 潘献辉\*, 尤 菁, 李宗雨, 吴建梅

自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津  
Email: \*xianhuiipan@123.com

收稿日期: 2019年5月7日; 录用日期: 2019年5月22日; 发布日期: 2019年5月31日

---

## 摘 要

水足迹评价是一种衡量人类活动对水资源影响的新技术, 有助于人类科学合理地利用水资源。本文简要分析了水资源利用现状, 阐述了水足迹理论的内涵, 总结了基于生命周期评价理论的水足迹评价方法, 综述了水足迹量化评价及其应用领域内的研究状况, 并展望了今后的研究方向。

---

作者简介: 董泽亮(1984-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士, 工程师, 主要从事水资源、分离膜检测及评价技术研究。  
\*通讯作者。

文章引用: 董泽亮, 潘献辉, 尤菁, 李宗雨, 吴建梅. 水足迹评价研究进展[J]. 水资源研究, 2019, 8(3): 234-241.  
DOI: 10.12677/jwrr.2019.83028

## 关键词

水资源, 水足迹, 生命周期, 评价

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

人类活动需要消耗和污染大量的水资源, 水资源危机是人类发展需要面对的严重问题之一。随着工业化、城镇化的深入发展, 水资源稀缺和水质恶化的形势将更加严峻。水资源利用和管理问题已逐渐成为全球可持续发展争论的焦点。科学合理的水资源利用方式和管理模式是实现水资源可持续开发利用和生态环境平衡的重要基础。

传统的工农业生产过程对水资源的利用率较低。为提高生产效率和经济效益, 生产者或水资源利用者往往会忽略对水资源自身和潜在的环境影响。为了更好地理解和量化人类活动对水资源及与水相关环境的影响, 有必要开发一种科学、通用的水资源利用评价技术, 以规范水资源的合理利用和科学管理, 为行业、区域、国家和全球层面制定水资源政策提供技术支撑。水足迹评价技术便是其中的一种。

荷兰水资源专家 Hoekstra 于 2002 年在虚拟水理论研究的基础上, 提出“水足迹”的概念[1]。虚拟水最早在农业生产领域被提出用于表达农业生产过程中所需要的水资源量, 后被扩展为生产商品和服务所需要的水资源量[2]。虚拟水考虑到了生产过程中整个产品系统的用水情况, 但对排放所产生的水劣化足迹关注较少。水足迹的提出不仅核算了产品在整个生命周期内对水资源的输入, 还充分考虑了输出对环境, 尤其是水资源的影响。狭义的水足迹定义是指一种产品(商品或服务)整个生产供应链中的用水量之和[3]; 广义的水足迹是指用于量化与水相关潜在环境影响的指标, 考虑对所有环境相关属性, 即与水相关的生态系统、人类健康和自然资源属性的影响[4]。与前些年提出的碳足迹一样, 水足迹亦属于生态足迹的范畴, 其核心思想均源自加拿大经济学家 William 在 1992 年提出的“生态足迹理论”[5], 它们以不同的方式衡量人类对自然资源的利用和影响, 都是产品生命周期评价过程中需要考虑的重要内容。

水足迹概念的提出, 量化了人类活动对水资源的影响, 拓展了传统水资源利用的评价内容。从消耗水与生产过程密切程度的角度来说, 水足迹包括直接水足迹和间接水足迹。直接水足迹是指产品系统生产运行中的直接取水; 间接用水是指供应链原材料、能耗、同化吸收排放等产生的水足迹。

水足迹不仅体现消耗的水量数据, 还体现水源类型、污染类型、污染量等多层面的指标。从这个角度来说, 可将其分为蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹三部分。蓝水足迹是指产品系统运行过程中对蓝水资源(地表水和地下水)的消耗; 绿水足迹是指对绿水资源(地表和土壤中不径流的水)的消耗; 灰水足迹是指同化吸收产品系统排放对水资源影响所需淡水的消耗。

水足迹研究及应用领域广泛, 不仅仅局限在具体产品的生产过程, 还体现在行业布局、区域发展以及国家水质资源战略规划等方面。从研究领域的角度可将水足迹分为产品水足迹、行业水足迹、区域水足迹、国家水足迹等。产品水足迹属于微观领域的水足迹, 是我们最早研究, 也是相对来说研究比较成熟的领域, 其研究成果能为我们改进生产工艺、提高水资源利用效率和改革生产管理制度提供指导性建议。行业、区域、国家等宏观领域的水足迹研究能够为与水相关的行业布局、区域发展、国家规划等政策的制定提供依据。

依据研究目的和范围的不同, 在水足迹分析和评价过程中, 既可以综合评价人类活动对与水相关环境的潜

在影响，也可以研究影响类型中的某些方面。前者称之为综合水足迹，后者称为非综合水足迹。我们通常所说的水足迹即为综合水足迹，其研究评价内容更全面科学。非综合水足迹的类型较多，有水可利用性足迹、水劣化足迹等[4]。水可利用性足迹如果只考虑水量，也称为水稀缺足迹。水劣化足迹包括水富营养化足迹、水酸化足迹、水生态毒性足迹等。

## 2. 水足迹评价方法

作为水足迹评价的国际标准方法，水足迹网络组织(WFN)于2011年出版的《水足迹评价手册》一直以来都是科研人员和水相关资源管理者开展水足迹评价的指导性方法[6]，是全球首部有关水足迹评价的国际标准手册。它详细阐述了水足迹的概念和开展水足迹评价的过程，介绍了蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹、产品水足迹、企业水足迹、国家水足迹的计算方法和步骤，实用性较强。规定了实施水足迹评价过程的四个阶段包括设定目标和范围、水足迹核算、水足迹可持续评价和制定水足迹响应方案。对每个阶段的实施过程都有详细的规定和说明。

另一种开展水足迹评价的方法，是基于国际标准化组织(ISO)于2014年发布的国际标准《ISO14046 Environmental management water footprint-principles, requirements and guidelines》而建立起的一种新的，更全面的水足迹评价方法[7]。ISO14046规定了基于生命周期评价(LCA)理论开展产品、过程和组织水足迹评价的基本原则、要求和指南。与WFN水足迹评价注重“用水量”相比，ISO水足迹评价充分考虑到了资源和环境的“影响”评估，其评价内容更科学全面。近年来，在借鉴国外相关标准和研究成果的基础上，我国也陆续发布实施了GB/T 33859、GB/T 24040、GB/T 24040等多项有关生命周期和水足迹评价领域内的标准[4] [8] [9]。下面以产品水足迹评价为例，上述标准为参考，总结归纳基于生命周期评价理论开展水足迹评价的具体过程。

基于生命周期评价标准的水足迹评价以产品周期为视角，聚焦与水相关的环境影响，实施过程中包括研究目的和范围、水足迹清单分析、水足迹影响评价、结果解释四部分内容。它们之间互相联系，相互影响，共同构成了水足迹评价的完整过程。如图1。

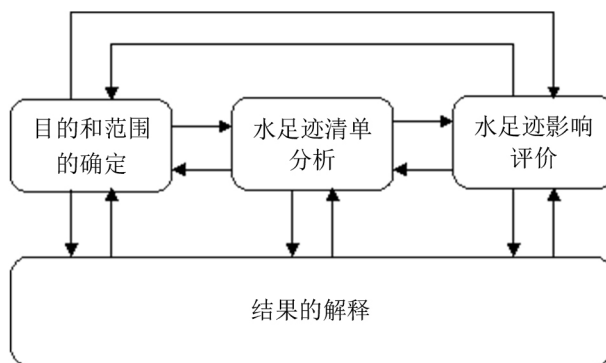


Figure 1. Four stages of water footprint assessment

图1. 水足迹评价的四个阶段

### 2.1. 目的和范围的确定

为保证水足迹评价的透明准确，在水足迹核算前必须明确说明研究目的和范围。研究目的包括研究对象、研究理由、应用意图等内容。研究范围应与研究目的相一致，其内容包括产品系统及边界、功能单位、数据质量要求、数据分配原则、取舍准则，影响评价方法和影响类型等。水足迹研究过程具有反复性，为了保证研究过程的一致性和研究结果的完整性，在实施过程中往往需要根据其它阶段的研究成果不断地调整研究范围和目的。作为一种耗水分析手段，水足迹评价可以关注产品整个生命周期内某个特定过程，如生产过程的水足迹，

也可以关注产品消费过程的水足迹，而边界条件的界定就是确定水足迹评价包含哪些单元过程以及输入输出的空间尺度。确认产品系统、划定边界条件、确认采集数据范围是下一步开展水足迹核算分析的基础。原则上凡是对产品系统水足迹有显著贡献的环节都需要进行核算。

## 2.2. 水足迹清单分析

水足迹清单分析就是量化产品系统内各单元过程的输入和输出，包括直接用水和间接用水[10][11]。直接用水数据包括用水量、水源类型、水质参数、用水方式等；间接用水数据包括原材料、能耗、能量种类和来源、排放等。数据要求原则上应采集生产系统实际运行过程中的原始数据，当原始数据无法收集或数据经审定不准确时，可使用来源于文献资料、计算数据、模型预测等二手数据。在水足迹核算过程中，物料和能量的回收利用不应被核算在水足迹的范畴之内。清单分析得到各单元过程的输入输出数据后，可按照水足迹评价手册提供的方法分别计算蓝水、绿水、灰水足迹，三者相加即可得到单元过程的水足迹[3]。由单元过程水足迹计算产品水足迹时一般可采用链式求和法、阶段累积法等。链式求和法适用于单一产品系统水足迹的核算，阶段求合法适用于多产品系统水足迹的核算。在多产品系统水足迹的核算过程中，单元过程的输入输出数据应根据分配程序，按一定规则分配到不同的中间产品或最终产品上。

## 2.3. 水足迹影响评价

水足迹影响评价是确定产品系统的输入输出过程会产生哪些与水资源相关的环境影响类型，并通过特征化模型量化影响程度的过程[4]。人类活动对水资源的影响与环境机制有关，不同的环境机制对应着不同的影响类型，可量化出不同的类型参数。水足迹影响评价应根据研究目的和范围合理确定影响类型、类型参数和特征化模型。水足迹清单分析与核算可以得到产品生产过程的总耗水量，水足迹影响评价则能够确定产品生产过程对与水相关环境潜在影响的具体方式和程度的大小，可理解为对水足迹清单分析数据的深层次处理，其中涉及到根据影响类型对清单分析数据进行分类、特征化、归一化等处理。在水足迹影响评价过程中，常见的影响类型有水富营养化、水酸化、热污染、水生态毒性等，根据研究目的和范围的规定，影响评价过程可以得到水可利用性、水劣化、水富营养化足迹等数据中的一种或多种。水足迹影响评价的直接目的是得到水足迹概要，就是一系列与水相关潜在环境影响类型参数结果的汇编。此外，水资源具有时空属性，在影响评价的特征化过程中还应考虑地域和时间因素的影响。

## 2.4. 结果的解释

水足迹评价的解释是为了确认水足迹评价过程是按照研究目的和范围的要求实施，并实现了研究意图而实施的一系列识别和评估过程。包括重大问题的识别，完整性、敏感性和一致性的检查评估和给出结论、局限和建议三部分内容。水足迹评价是一种迭代分析过程，具有反复性，水足迹评价的每个阶段都使用其它阶段的研究结果，确保了研究成果的完整性，并与研究目的和范围保持一致。完整性检查是验证研究得到的数据和结论是否全面完整。一致性检查是验证研究过程中不同阶段使用的假设、方法和数据等是否前后一致。敏感性检查是为了验证重要数据信息、核算方法、量化模型对研究结果是否具有显著影响。水足迹评价的最终结果要给出研究结论，以研究结论为依据提出改进建议并指出研究成果的局限性。

需要特别说明的是，水足迹评价尽管是一种更科学合理的评价水资源利用的手段，但仍具有一定的局限性。水足迹研究不考虑经济和社会效益，仅衡量人类活动对水资源和与水相关环境影响的大小，并不能充分描述产品和过程的全部潜在环境影响，更不是评价产品优劣和过程合理与否的决定性指标。水足迹核算的结果可作为耗水指标的参考，与其它评价技术相结合使用。总体来说，水足迹的研究还处于起步发展阶段，其研究过程和结果还有很多不足之处。水足迹清单分析的核算方法目前还不够完善准确。在环境影响评价过程中，影响类型、

特征化模型的选择也没有统一公认的标准。由于水足迹理论研究和在我国起步相对较晚,研究领域较窄,可用于核算水消耗的数据库很少或是没有相对可靠的数据,统计数据收集困难,很多重要的一手数据很难获得,尤其是来源于上下游产业和过程的间接水足迹数据匮乏,多数情况下会采用耗水量数据作为参考,没有充分考虑“影响”的评估,导致水足迹核算结果还具有较大的不确定性。

### 3. 水足迹评价研究进展

作为一种新兴的水资源利用分析管理方法,水足迹的概念自提出以来得到了众多科研工作者关注。很多国家和地区相继对其开展了广泛深入的研究,以下从水足迹的核算评价和以水足迹评价为基础的应用研究两个方面叙述。

#### 3.1. 水足迹的量化计算及评价研究

水足迹的量化计算是水足迹评价及应用的基础,也是目前研究相对成熟的领域。人们最早在农牧业领域开展了农牧产品水足迹的核算研究,Hoekstra、Chapagain 等[12] [13]对咖啡、棉花、肉类等产品的水足迹进行了核算,国外这方面的研究成果较多。鉴于水足迹核算评价的时空属性,这里重点介绍国内的研究状况。国内对水足迹的研究虽然起步较晚,但在各领域水足迹的量化计算模型及评价方法的研究方面,均取得了较多的研究成果。

在纺织品、服装、丝绸等轻工业产品生产领域,王来力等[14]引入水足迹理论,对纺织品与服装的工业水足迹进行了核算和评价,重点探讨了边界条件、核算方法、数据分配和结果评价等关键性问题,提出了提高水足迹核算结果的准确度、减少蓝水水足迹、降低单类产品水耗的方法。张音等[15]以水足迹理论和方法为基础,界定了纺织服装工业用能源及物料水足迹系数的基本概念,通过对能源供给和核算方法的研究,对能源及物料水足迹系数进行了计算和不确定分析,确定了原煤、石油天然气、火电等能源和纸制品、塑料制品、金属制品等物料的水足迹系数,为相关领域内工业产品水足迹的准确核算奠定了基础。何琬文等[16]对丝绸产品生产加工阶段的基准水足迹进行了核算和评价,重点关注了水资源消耗和水污染物排放的水环境负荷,细化并准确核算了各种非综合性水足迹。

在水稻、小麦、棉花等农作物生产领域,何浩等[17]运用水足迹理论和方法计算了湖南省水稻生产的水足迹,分析了其变化和构成特征。在研究成果的基础上对湖南省今后的水稻种植策略提出了建议。邓晓军等[18]根据棉花生产水资源消费的特征,以水足迹评价理论与方法为基础,提出了棉花消费水足迹的概念和模型,对新疆地区棉花生产的水足迹进行了计算和分析,通过影响评价研究探讨了棉花生产带来的生态环境问题。盖力强等[19]核算了我国河北、北京、天津等华北地区小麦、玉米的虚拟水含量及其生长生产水足迹,并重点分析评价了绿水的重要性的灰水对环境的影响。

在钢铁、煤炭、氯碱化工等高耗水重污染产品生产领域,尹婷婷等[20]对我国钢铁生产过程中的虚拟水和水足迹进行了核算和影响分析,提出了钢铁生产过程中水资源合理利用的建议。丁宁等[21]在基于生命周期水足迹评价方法的基础上,提出了包含蓝水足迹、灰水足迹和间接水足迹的能源系统水足迹评价模型,并将此模型应用于煤炭生产过程的水足迹计算。该研究为能源系统水足迹的评价提供了理论方法,并为以煤炭为原料或燃料的下游产品水足迹的核算评价提供了数据支撑,具有重要意义。油惠仙等[5]通过分析氯碱行业产品生产过程中耗水的结构,提出了化工产品水足迹的核算模型,并以此模型为基础计算出了氯碱产业链中各产品耗水账户的水足迹。张明等[22]对我国造纸行业的用水和排水情况进行了分析总结,对生产过程的水足迹进行了核算,并对水足迹的构成做了分析评价。

此外,食品[23] [24]、养殖[25] [26]、能源[27] [28]、建材[29]、服务[30]等其它领域的水足迹核算评价研究,在近几年也有一定的报道。研究多集中在生产过程、日常消费、环境影响等领域,总的来说研究视角相对狭窄,

研究内容还有待深入。通过对十余年来我国水足迹研究情况的梳理和分析,可以明确的是对水足迹的量化计算研究,目前已形成了较为系统的理论基础和分析核算方法,完成了多个领域产品水足迹的核算分析,其准确性虽有不足,但也在不断提高。随着经济社会的快速发展,来自水资源短缺和环境保护领域的压力会逐渐加大,未来第三产业和重污染领域产品水足迹的量化计算研究会成为研究的重要方向。

### 3.2. 水足迹理论为基础的宏观应用研究

水足迹评价的研究不仅能够为高耗水产品的工艺技术和生产管理提供建议,也能为行业、区域、国家水资源利用政策的规划指明方向。基于水足迹核算评价方法研究成果的不断完善,越来越多的学者开始关注行业、区域、国家等宏观水足迹的研究,并在此基础上提出了新的节水供水和可持续发展策略。YU Y, VANHAM D 等[31][32]开展了英国、欧盟、全球的水足迹评价,并对相关区域水资源的利用战略进行了分析和规划。国内在此领域内的研究也越来越多,亦取得了一定的研究成果。

为了实现水资源的高效、可持续利用,张吉辉等[33]分析了经济社会系统和自然生态系统水资源循环流动原理,构建了基于水足迹核算的区域水资源协调优化模型和协调后效性分析指标体系。并以天津市为例,测算了其水资源足迹,评价分析了水资源足迹的构成、水资源贸易和经济社会效益,构建了对应的水资源协调优化模型和协调后效性评价指标体系,以此为依据从水资源全生命周期角度提出了协调与控制策略,为天津市及同类区域水资源的高效利用和协调提供了决策参考。孙义鹏等[34]引用虚拟水及水足迹相关理论、模型和方法,对大连市26种农、牧及工业产品的虚拟水贸易和大连市的水足迹进行了计算,并分析评价了其结构特征和可持续性,提出了实现大连市水资源可持续利用的贸易政策。尚海洋等[35]通过对水足迹与碳足迹在概念、研究方法和应对策略等方面进行比较研究,提出了开展水足迹消费、水足迹贸易等相关政策研究的可能性,指出了提高水资源利用效率和经济效率的几种可能途径。

基于流域内,区域间的水资源合理分配和协同发展理念,耿涌等[36]借用水足迹评价的理论和方法,界定了流域水足迹的内涵。通过分析流域沿岸各区域水资源利用、环保投入和生态服务的耗费情况,提出了流域生态补偿标准计量流程及不同情况下的流域生态补偿标准测算模型,能够客观准确地量化流域生态补偿额度,为管理决策者正确分析和解决流域各区域间的协作提供了科学的依据和支持。郭瑞鹏等[37]以水足迹理论为基础,提出了流域生态补偿定量模型,并以浑河流域的抚顺市和沈阳市为例,开展了浑河流域生态补偿的定量研究,研究成果可为全国各流域不同区域水资源的合理利用和协同发展提供借鉴。苑清敏等[38]基于虚拟水足迹模型,对京津冀地区水足迹与水盈余/赤字的空间变化进行了研究,构建出了基于水足迹的生态补偿标准模型,量化了京津冀三地间的生态补偿额度,给出了京津冀水资源合作的补偿机制。为京津冀地区用水安全保障体系的构建和生态环境的共建共享提供了参考。

未来水足迹的量化评价将逐渐成为基础性的研究工具,其量化评价理论、核算方法和影响模型的准确性仍有待进一步的提高。统计数据的准确性,以及来源的多样化、差异性都会导致水足迹核算结果和影响评价产生偏差,尤其灰水足迹、间接水足迹的核算较为复杂。随着水足迹理论和评价技术的不断发展,相关领域数据库的不断完善,水足迹评价的科学性和准确性将不断得到提高,其在相关领域的应用研究也将越来越广泛,如衡量人类水资源消耗对生态环境的影响、提出新的科学的水资源管理政策、产业结构优化等。

### 基金项目

国家“十三五”重点研发计划课题(2018YFF0215705)。

### 参考文献

- [1] ALLAN, J. A. Virtual water: A strategic global solutions to regional deficits. *Ground Water*, 1998, 36(4): 545-546.

<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>

- [2] HOEKSTRA, A. Y., HUNG, P. Q. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change: Part A*, 2005, 15(1): 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004>
- [3] HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K. The water footprint assessment manual. The Hague: Water Footprint Network, 2011.
- [4] GB/T 33859-2017, 环境管理——水足迹——原则、要求与指南[S].  
GB/T 33859-2017, Environmental management—Water footprint—Principles, requirements and guidelines. (in Chinese)
- [5] 油惠仙. 氯碱产业链化工产品水足迹核算分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2015.  
YOU Huixian. Water footprint accounting analysis of chemical products for chloral-alkali production chain. Master's Degree Thesis, Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K., ALDAYA, M. M., et al. The water footprint assessment manual-setting the global standard. London, Washington DC: Earth-Scan, 2011.
- [7] ISO 14046-2014, Environmental management—Water footprint—Principles, requirements and guidelines.
- [8] GB/T 24040-2008, 环境管理——生命周期评价——原则与框架[S].  
GB/T 24040-2008, Environmental management—Life cycle assessment—Principles and frameworks. (in Chinese)
- [9] GB/T 24044-2008, 环境管理——生命周期评价——要求与指南[S].  
GB/T 24044-2008, Environmental management—Life cycle assessment—Principles, requirements and guidelines. (in Chinese)
- [10] WANG, L. L., DING, X. M., WU, X. Y., et al. Textiles industrial water footprint: Methodology and study. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2013, 72(11): 710-715.
- [11] ANDREEA, E. S., CARMEN, T. Water footprint assessment in the winemaking industry: A case study for a Romanian medium size production plant. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 43: 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.051>
- [12] CHAPAGAIN, A. K., HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.022>
- [13] CHAPAGAIN, A. K. The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*, 2012, 2(2): 3-8. <https://doi.org/10.2527/af.2012-0038>
- [14] 王来力, 吴雄英, 丁雪梅, 等. 纺织品及服装的工业水足迹核算与评价[J]. *纺织学报*, 2017, 38(9): 162-167.  
WANG Laili, WU Xiongyig, DING Xuemei, et al. Calculation and assessment of industrial water footprint of textiles and apparel. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(9): 162-167. (in Chinese)
- [15] 张音, 巢晔, 吴雄英, 等. 纺织服装工业用能源及物料的水足迹系数[J]. *印染*, 2013(18): 41-45.  
ZHANG Yin, CHAO Huang, WU Xiongyig, et al. Water footprint factor of energy and materials in textile and garment industry. *Dyeing & Finishing*, 2013(18): 41-45. (in Chinese)
- [16] 何琬文, 李一, 王晓蓬, 等. 丝绸产品基准水足迹核算与评价[J]. *现代纺织技术*, 2018, 26(2): 41-45.  
HE Wanwen, LI Yi, WANG Xiaopeng, et al. Calculation and assessment of benchmark water footprint of silk products. *Advanced Textile Technology*, 2018, 26(2): 41-45. (in Chinese)
- [17] 何浩, 黄晶, 淮贺举, 等. 湖南省水稻水足迹计算及其变化特征分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 294-298.  
HE Hao, HUANG Jing, HUAI Heju, et al. The water footprint and its temporal change characteristics of rice in Hunan. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 294-298. (in Chinese)
- [18] 邓晓军, 谢世友, 崔天顺, 等. 南疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 176-180.  
DENG Xiaojun, XIE Shiyou, CUI Tianshun, et al. Research of the water footprint of cotton consumption and its effect on ecological environment in southern of Xinjiang. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(2): 176-180. (in Chinese)
- [19] 盖力强, 谢高地, 李士美, 等. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(11): 2066-2071.  
GAI Liqiang, XIE Gaodi, LI Shimei, et al. A study on production water footprint of winter-wheat and maize in the North China Plain. *Resources Science*, 2010, 32(11): 2066-2071. (in Chinese)
- [20] 尹婷婷, 李恩超, 侯红娟. 钢铁工业产品水足迹研究[J]. *宝钢技术*, 2012(3): 25-28.  
YIN Tingting, LI Enchao and HOU Hongjuan. Research on water footprint of steel products. *Baosteel Technology*, 2012(3): 25-28. (in Chinese)
- [21] 丁宁, 逯馨华, 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): 4228-4233.  
DING Ning, LU Xinhua, YANG Jianxin, et al. Water footprint of coal production. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(11): 4228-4233. (in Chinese)
- [22] 张明, 王仁荣, 邢宝珍, 等. 造纸行业的水足迹[J]. *中华纸业*, 2013, 34(17): 50-53.  
ZHANG Ming, WANG Renrong, XING Baozhen, et al. Water footprint of paper production. *China Paper*, 2013, 34(17): 50-53. (in Chinese)

- [23] 何开为, 张代青, 侯璠, 等. 云南省城乡居民膳食消费的水足迹计算及评价[J]. 水资源保护, 2015, 31(9): 114-118.  
HE Kaiwei, ZHANG Daiqing, HOU Jin, et al. Calculation and evaluation of water footprint about dietary consumption of urban and rural residents in Yunnan Province. *Water Resources Protection*, 2015, 31(9): 114-118. (in Chinese)
- [24] 郑翔益, 孙思奥, 鲍超. 中国城乡居民食物消费水足迹变化及影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 17-22.  
ZHANG Xiangyi, SUN Si'ao and BAO Chao. Urban and rural water footprints for food consumption in china and governing factor analysis. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(1): 17-22. (in Chinese)
- [25] 欧阳佚亭, 宋国宝, 陈景文, 等. 中国淡水池塘养殖鱼类排污的灰水足迹及污染负荷研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(3): 317-323.  
OU-YANG Yiting, SONG Baoguo, CHEN Jingwen, et al. Grey water footprint and pollution loadings of freshwater pond-cultured in china. *Environmental Pollution and Prevention*, 2018, 40(3): 317-323. (in Chinese)
- [26] 黄登迎, 杨红. 新疆畜牧业发展用水研究——基于水足迹的视角[J]. 节水灌溉, 2018(4): 96-99.  
HUANG Dengying, YANG Hong. A study on water use of Xinjiang animal husbandry development from the perspective of water footprint. *Water Saving Irrigation*, 2018(4): 96-99. (in Chinese)
- [27] 袁旭, 陆颖, 毕晓静, 等. 一种水电站水足迹改进计算方法[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 165-168.  
YUANG Xu, LU Ying, BI Xiaojing, et al. A new water footprint calculation method for hydroelectricity. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(7): 165-168. (in Chinese)
- [28] 袁旭, 陆颖, 何开为, 等. 澜沧江中下游干流水电开发水足迹研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 37-40.  
YUANG Xu, LU Ying, HE Kaiwei, et al. Research on water footprint of hydropower in middle-lower reaches of Lancangjiang River. *Water Resources and Power*, 2018, 36(6): 37-40. (in Chinese)
- [29] 刘源, 范金岭. 企业水足迹及其在卫生陶瓷企业的应用案例分析[J]. 陶瓷, 2014(7): 9-13.  
LIU Yuan, FAN Jinling. Enterprise water footprint and its application case analysis in sanitary ceramics enterprises. *Ceramics*, 2014(7): 9-13. (in Chinese)
- [30] 马忠, 张芯瑀, 冯浩源. 基于混合 LCA 模型的酒店服务业水足迹量化研究——以张掖市为例[J]. 环境科学学报, 2018, 38(9): 3780-3786.  
MA Zhong, ZHANG Xinyu and FENG Haoyuan. Research on the water footprint quantification of the hotel service industry based on the hybrid LCA model: A case of Zhangye. *Acta Scientiae Circumstantiate*, 2018, 38(9): 3780-3786. (in Chinese)
- [31] YU, Y., HUBACEK, K. and FENG, K. Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1140-1147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.008>
- [32] VANHAM, D., BIDOGLIO, G. A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 2013, 26: 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.021>
- [33] 张吉辉. 基于水足迹的区域广义水资源动态协调与控制[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.  
ZHANG Jihui. Dynamic coordination and control of general water resources based on water footprint. PhD Thesis, Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [34] 孙义鹏. 基于水足迹理论的水资源可持续利用研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
SUN Yipeng. Water resource sustainable utilization based on water footprint. PhD Thesis, Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [35] 尚海洋, 宋妮妮. 碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J]. 水资源保护, 2013, 34(3): 15-21.  
SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint: Comparison of concepts, methods and policy responses. *Water Resources Protection*, 2013, 34(3): 15-21. (in Chinese)
- [36] 耿涌, 戚瑞, 张攀. 基于水足迹的流域生态补偿标准模型研究[J]. 中国人口资源与环境, 2009, 19(6): 11-16.  
GENG Yong, QI Rui and ZHANG Pan. A water footprint based model on river basin eco-compensation. *China Population, Resources and Environment*, 2009, 19(6): 11-16. (in Chinese)
- [37] 郭瑞鹏. 基于水足迹理论的浑河流域生态补偿的定量研究[J]. 吉林水利, 2018(4): 16-19.  
GUO Ruipeng. Quantitative study on ecological compensation in Hunhe basin based on water footprint theory. *Jilin Water Conservancy*, 2018(4): 16-19. (in Chinese)
- [38] 苑清敏, 孙恺溪. 基于虚拟水足迹的京津冀合作生态补偿机制研究[J]. 节水灌溉, 2018(4): 73-77.  
YUAN Qingmin, SUN Kaixi. Research on cooperation ecological compensation mechanism based on virtual water footprint of Beijing-Tianjin-Hebei. *Water Saving Irrigation*, 2018(4): 73-77. (in Chinese)