

水足迹理论研究综述

周玲玲, 王琳, 王晋

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 水足迹概念的提出,有别于传统的“取水”指标,创新性地将人们的生产和消费与水资源的消耗和污染联系起来,让人们意识到水资源的总体消耗和污染最终是与生产、消费产品的类型和数量密不可分的。水足迹理论应用研究为水安全战略研究提供了重要基础,成为了水资源管理领域的研究热点之一。本研究从水足迹核算的时空尺度(A级、B级和C级尺度)、水足迹核算范围(蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹)、水足迹可持续性评价及其国内实证研究四个方面对国内外水足迹的研究现状展开评述,并对其研究前景进行了展望。

关键词: 水足迹; 水足迹核算; 水足迹可持续性评价

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)05-0106-06

Review on study of water footprint theory

ZHOU Lingling, WANG Lin, WANG Jin

(College of Environmental Science and Engineer, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The concept of water footprint is different from the traditional “water – drawing” index. It has innovatively combined the people’s production and consumption with water consumption and pollution, and mak the public realize that the overall consumption and pollution of water resources is inseparable with the type and quantity of production and consumption products. The application of water footprint theory provided an important basis for the strategy study of water safety, witch has become a research hotspot in water resources management. This paper summarized the research progress of the spatial – temporal scale of water footprint accounting (Class A, B and C scale), the range of water footprint accounting (blue, green and grey water footprint), the sustainable assessment and the empirical study of the water footprint at home and abroad. Finally it forecasted the research prospective in water footprint.

Key words: water footprint; water footprint accounting; sustainable assessment of water footprint

1 水足迹理论的提出与发展

水是生命之源。人类活动会消耗和污染大量的水资源,如灌溉、冷却、加工、洗浴及洗涤等,总的水资源消耗和污染是各种独立的水资源需求和水污染活动之和。然而,在以往的水资源管理和实践中,很少有研究者关注到水资源的总体消耗和污染最终是与商品消费类型、数量以及经济结构密切相关,从而忽视了从整个生产和供应链中研究水的消费和污染。

2002年,荷兰屯特大学的Hoekstra教授类比“生态足迹”概念提出了“水足迹”概念。水足迹可形象地解释为“水在生产和消费过程中踏过的脚印”^[1]。水足迹概念将人们的生产和消费与水资源的消耗和污染联系起来,让人们意识到水资源的总体消耗和污染最终是与生产、消费产品的类型和数

量密不可分的。与此同时,水足迹作为和人们生产、消费有关的用水指标,将水足迹与水资源可获得量结合起来,能够揭示水资源依赖或危机状态,为水安全战略研究提供了重要基础。

自2002年水足迹概念提出以后,国际上曾多次召开相关的研讨会与培训,但水足迹似乎一直没有引起人们足够的重视。2008年《地球生命力报告》首次引进第三个衡量地球健康状况的指标“水足迹”(water footprint),用来显示人类对地球生态系统的需求状况。“水足迹”逐渐引起了世界各国政府和组织的高度重视,从以往单纯的量化核算,更多地进入到政策执行层面。2011年,Hoekstra教授领导的水足迹网络(WFN)在全球首次发布了《水足迹评估手册》,为许多政府和企业开展水足迹核算与评价工作奠定了基础。水足迹逐渐成为了水资源管理领域的研究热点之一。

2 国内外水足迹理论研究进展

国内外关于水足迹研究的文献大部分发表于 2007 年以后,研究也主要集中在水足迹核算,很少有研究覆盖水足迹评价的所有阶段,核算的范围和时空尺度也因研究目的不同而有差异。本文将从水

足迹核算的时空尺度、水足迹核算范围、水足迹可持续性评价及其国内实证研究四个方面展开阐述。

2.1 水足迹核算的时空尺度

根据研究的目的是和掌握的基础数据情况,水足迹核算和评价可分为 A 级、B 级和 C 级尺度。三种尺度所需的数据源及典型应用见表 1^[2]。

表 1 水足迹核算的时空尺度

级别	空间尺度	时间尺度	所需用水数据来源	核算的典型应用
A 级	全球平均	年	可获得的有关产品或过程的典型耗水和污染的文献与数据库	提高认识;粗略确定总水足迹的重要部分;全球水消耗的预测
B 级	国家、区域或特定流域	年或月	同上,但采用国家、区域或特定流域的数据	空间扩展和变化的粗略确定;为热点确定和水分配决定提供基础知识
C 级	小流域或田间	月或日	经验数据或(若无法直接测量)基于当地的年度水消耗和污染最佳估计	为进行水足迹可持续评价提供基础知识;构建减少水足迹和相关地方影响的战略

2.1.1 A 级尺度 A 级为详细度最低的级别。自 2002 年以来,Hoekstra、Chapagain 等人已发表了多篇关于全球尺度的水足迹研究成果。Hoekstra 和 Hung(2003)^[1]、估算了基于 1995 - 1999 年全球农产品贸易量、全球活体动物及其畜产品贸易量的虚拟水流。此后,Chapagain 和 Hoekstra^[3]又估算了 1997 - 2001 年全球每个国家的水足迹。这两次都是对水足迹的最初研究,在理论和方法上还不成熟,部分基础数据尚不清楚、不完善,但对各国水足迹的粗略估计基本一致,其结果表明:人均水足迹相对较高(大于 2 000 m³/a)的国家主要是比利时和荷兰,人均水足迹中等的国家(1 000 m³/a)有日本、美国、墨西哥,人均水足迹相对较低的国家主要有中国、印度和印度尼西亚,其中中国人均仅为 419 m³/a。2007 年,Hoekstra^[4]在进一步完善水足迹理论和方法的基础上对全球每个国家的水足迹(1997 - 2001 年)进行了再次核算。研究表明水足迹的大小主要取决于消费量、消费模式、气候条件和农业生产方式四个因素。Chapagain(2008)^[5]对 1997 - 2001 年间国际贸易中的 285 种农产品和 123 种牲畜产品的虚拟水流量进行了计算,并对工业产品的平均虚拟水量进行了粗略估算。

众多研究成果表明^[5-8],国家间的虚拟水流动趋势愈加显著,全球每年虚拟水流量必将超过 1 万亿 m³。Hoekstra 指出人类所面临的水资源问题不仅仅是区域内的问题,而应从跨流域甚至是全球尺度上去探讨解决^[9]。

2.1.2 B 级尺度 B 级为基于可获得地理区域数

据库的国家平均、区域平均或特定流域的水足迹数据。目前,很多学者结合虚拟水理论已对多数国家或区域展开了水足迹的实证研究。

(1) 荷兰:Hoekstra 和 Chapagain^[10](2007)和 Van Oel 等人(2009)^[11]分别核算了荷兰 1997 - 2001 年和 1996 - 2005 年间的水足迹状况。结果表明,荷兰是个水资源高度依赖进口的国家,其消费者外部水足迹的影响在水资源严重短缺国家中是最高的。

(2) 西班牙:西班牙水资源分布不均,有些地区的干旱日益加剧。Aldaya^[12-13]认为西班牙的水资源短缺危机主要是由于农业部门管理不当造成的,他将虚拟水和水足迹思想融入西班牙拉曼查自治州水资源管理政策中,探索农业生产的水文和经济价值^[13]。2008 年,西班牙环境部在最近的《欧盟水框架指令》(2000/60/EC)(WFD)规定的流域管理规划中首先采用了水足迹指标。

(3) 印度:随着人口的快速增长和生活水平的不断提高,水资源需求量不断增加,然而人均水资源利用率却日益减少。Kumar 和 Jain(2007)^[14]回顾了印度国内不同产品的虚拟水含量,并分析了其虚拟水贸易现状。Kampman(2008)^[15]核算了印度 1997 - 2001 年的国内居民消费水足迹大小人均均为 777 m³/a。计算结果进一步表明,印度每年都有 220 亿 m³ 虚拟水从印度北部流向东部,此结果与印度政府提议的“从水资源丰富的东部调水至水资源短缺的北部”方案相悖论。

(4) 中国:Ma 等(2006)^[16]通过计算表明,东北地区每年以虚拟水的形式出口 520 亿 m³ 水资源,远

远超过通过“南水北调”工程输入的最大设计水资源量。Liu (2008)^[17] 分析了中国食品消费模式对水资源需求的影响关系, 研究指出, 随着生活水平的提高, 肉类蛋奶等消费量的增加, 食品消费中所需的水资源量不断增长, 中国不仅需要加绿水管理, 而且也需要增加虚拟水进口来满足不断增长的食品用水量。Hubacek (2009)^[18] 在分析改革开放后中国城市化、生活方式改变以及其他重要社会经济发展趋势的基础上, 使用投入产出模型计算了 2020 年中国的生态足迹和水足迹。

国外学者也对英国^[19-20]、德国^[21]、印度尼西亚^[22]等国家的水足迹状况进行了核算和分析。

2.1.3 C 级尺度 C 级的水足迹核算需要准确的数据来源, 能够明确水足迹的地理区域和时间。高精度时空分布的水足迹核算适于为特定地区制定水足迹减量策略^[2]。然而受数据源和计算精度的约束, 目前 C 级尺度上的水足迹研究文献报道罕见。

2.2 水足迹核算范围

根据生产或消费过程所消耗的水资源的类型可将水足迹分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。

2.2.1 水足迹消耗指标 - 蓝水足迹 蓝色水是指传统的地表和地下水资源。蓝水足迹衡量的是一段时间内消耗(即不能直接回到原流域)的可用蓝水量。在一段时间内, 地下水储蓄和河流径流是有限的, 人们消耗的水不能超过可利用的水资源量。

在对蓝水足迹进行核算时需要大量的基础数据, 目前, 国外的一些研究机构已经建立了几个成熟的工业、农业过程蓝水数据库。水足迹网络的网站就有世界主要作物水足迹地理区域分布的数据, 这些数据可用来进行 B 级的水足迹核算。由于工业产品虚拟水贸易量仅占全球虚拟水贸易总量的 10%^[23], 且相对于农业和畜牧业生产工艺复杂, 迄今为止人们对工业产品水足迹研究还处于起步阶段^[24]。

2.2.2 水足迹消耗指标 - 绿水足迹 为区别于蓝色水, 瑞典水文学家 Falkenmark 提出了“绿色水”, 它是指赋存于土壤非饱和含水层(包气带)中的土壤水, 以蒸散发的形式由植被利用^[25]。绿水足迹为农田所蒸发的储存在土壤中雨水的水资源总量。

传统的水资源取水核算只关注蓝水, 对绿水这一重要生产因素的评价过低^[26-27]。然而, 研究绿水足迹对干旱地区的水安全和粮食安全至关重要。完全利用绿水, 即完全依靠天然降水为水源而种植农作物就是所谓的“雨养农业”。将蓝水足迹和绿水足迹区分开来非常重要, 因为生产活动对地表和地下水的

使用所产生的水文、环境和社会影响, 与使用雨水所产生的影响和成本有非常明显的差异^[19,28]。

农业消耗的绿水可以通过经验公式或采用合适的模拟作物蒸散发的模型进行测量或评价。模拟作物生长和需水量的方法和模型有很多。常用模型是 GEPIC 模型^[29]、EPIC 模型^[30-31]、CROPWAT 模型^[32]以及 AQUACROP 模型^[33]。目前, 国内外学者较多采用 CROPWAT 模型计算农作物水足迹。

2.2.3 水足迹污染指标 - 灰水足迹 灰色水表示人类的排污活动对水资源的间接消耗。灰水足迹表示“占用的纳污能力”, 以占有的水量来衡量水污染的优势在于不同类型的污染物有了同一个起点, 即稀释污染物所需水量。2008 年, Hoekstra 和 Chapagain^[19]首次提出“灰水足迹”的概念, 并将其定义为“排放到水体的污染负荷除以最大容许浓度”。2009 年, Hoekstra 等人(2009)^[34]通过研究表明灰水足迹核算时采用最大容许浓度和自然本底浓度的插值代替上句定义中的最大容许浓度更加科学。水足迹网络的灰水足迹工作小组^[35]进一步完善了灰水足迹的概念, 包括计算时考虑取水的水质, 面源污染的灰水足迹评价采用多层次的方法以满足不同详细程度的要求等。近期关于灰水足迹量化的研究成果较多^[11,22,36-40]。

计算作物生长的蓝水、绿水和灰水足迹需要大量的数据源, 一般来说最好使用相关作物的当地数据。大多数情况下, 收集当地详细的数据非常困难。如果只是粗略的计算, 可以考虑采用研究地周边、所在地区或是国家的平均数据, 这些数据比较容易获得。迄今, 农、林作物及其加工品的水足迹研究成果很多^[39-42]。生物能源是近几年产品水足迹的研究热点之一, 其相关的研究报道较多^[39,43-46]。

2.3 水足迹可持续性评价

Hoekstra (2008)^[19]最早明确提出水足迹核算之后需要进行可持续评价。由于全球淡水资源是有限的, 研究者需要从更大的尺度评价水足迹的可持续性。

水足迹可持续评价是水足迹和可利用淡水资源量的比较。水足迹的可持续性有不同的维度(环境、社会、经济), 造成了不同水平的影响(初级影响、次生影响), 包含了不同的“色彩”(蓝水、绿水和灰水)^[2]。最近几年人们对该问题的关注和研究不断增加。Van Oel 等 (2009)^[11]、Kampman 等 (2008)^[15]以及 Chapagain 和 Orr (2008)^[47]最早比较了水足迹与当地的实际可利用水资源量, 从而首次确定了水资源匮乏的热点地区。所谓热点地区即

指水足迹不可持续、必须降低的地区和阶段。确定了热点地区之后,可以深入研究热点地区水足迹对环境、经济、社会的影响。水足迹可持续性评价方法的优点在于能用定量化的方式反映水资源可持续利用的时间、空间特征、影响方式及影响程度,从而确定水足迹减量目标,为区域水资源安全管理提供决策支持。

2.4 国内实证研究

国内学者引入水足迹理论后对我国西北地区、各省份、大连、上海等地的水足迹进行了初步研究,水足迹在解决我国水资源短缺与粮食安全、生态环境等问题得到初步应用。

(1)国家尺度:马静等(2004)^[48]利用彭曼公式和生产树法分别计算了1999年全国31个省区26种主要农作物和6种主要动物产品的虚拟水含量。王新华等(2005)^[49]用自下而上的水足迹核算方法,分析计算了2000年中国各省的人均水足迹。之后,高孟绪等(2008)^[50]在王新华等人研究基础上借助于统计分析软件SPSS对31个省区人均水足迹进行了系统聚类分析。孙才志等(2010)^[51]以往相关研究的基础上,计算出1997-2007年中国31个省市水足迹强度,用其衡量中国水资源利用效率水平。

(2)省级尺度:2007年,邓晓军等^[52]采用自上而下的方法计算分析了四川省2004年的水足迹及其相关评价指标。随后,又计算了2005年上海市的水足迹。黄晶等(2010)^[53]运用水足迹理论、采用自上而下的方法计算评价了1990-2005年北京市水足迹及水资源利用的可持续性,在此基础上进一步分析了北京市农业用水结构的变化特征。陈俊旭等(2010)^[54]利用水足迹对北京市水资源占用进行估计,得出2006年北京市水资源实际占用量为138.28亿 m^3 ,能更真实反映北京市水资源实际占用情况。与此同时,国内其他学者应用水足迹理论也对河南、山东、湖南、辽宁等省的水资源利用状况展开了研究。

(3)市级尺度:孙义鹏(2007)^[55]采用自下而上的方法对2002年大连市26种农、牧、渔业产品及工业产品的虚拟水贸易量及大连市的水足迹进行了计算。李明(2007)^[56]以长春市为例,运用产品虚拟水研究方法核算并分析了该区域1994-2004年的水足迹及其变化。张斌等人(2012)^[57]基于水足迹理论计算了连云港市2008年的人均水足迹、水资源匮乏度、水资源压力、虚拟水赤字等评价指标以衡量水资源利用的可持续性。

(4)产品水足迹:盖力强^[58]、何浩^[59]、沈淑

平^[60]分别对研究区域内的小麦、水稻、玉米的生长水足迹进行计算与分析,并探讨其时空分异规律。项学敏等^[61]计算了石油制品中虚拟水含量。

3 水足迹理论研究述评

(1)水足迹是一个体现消耗的水量、水源类型以及污染量和污染类型的多层面的指标,是水消耗和水污染的体积衡量指标,为理解消费者和生产者与淡水系统之间的关系提供了更加合理和广阔的视角。

(2)水足迹把各种“颜色”(蓝水、绿水、灰水)的水整合在一起,弥补了传统水资源核算中只重视蓝水的缺点;水足迹核算为人类各种活动对水资源的占用提供了明确的时空信息;水足迹评价的对象不仅包含蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。从水足迹视角出发,有利于更加全面的审视水资源的可持续性。

(3)水足迹的概念提出时间还比较短,在应用层面上的实践还十分有限。目前水足迹研究尺度多集中在全球、国家或省级层次,市级及以下尺度的水足迹研究较少。还需进一步完善概念,推动概念的实践层面的指导作用。

(4)农业是用水大户,占全球淡水总量的80%左右,目前国内外水足迹核算重点为农业或农产品的蓝、绿水足迹;由于工业产品中的虚拟水含量相对农产品而言数量较小,再加上工业品生产工艺复杂,虚拟水含量计算繁琐,目前对工业品水足迹的核算多采用估算方法或忽略计算。尽管单位工业品商品虚拟水含量虽然少,但是贸易量大,其消耗的虚拟水资源总量也是不容忽视的。

(5)国内外学者对区域水资源足迹趋势预测和可持续性评价研究较少,是今后水足迹理论研究的重点。

参考文献:

- [1] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [C] // Value of Water Research Report Series No. 12. Delft, Netherlands: IHE, 2003: 13 - 23.
- [2] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. 水足迹评价手册 [M]. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2012: 2.
- [3] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water Footprints of Nations [C] // Value of Water Research Report Series No. 16. Delft, Netherlands: UNESCO - IHE Institute for Water Education, 2004: 11 - 32.
- [4] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprint of nations:

- Water use by people as a function of their consumption pattern [J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 35–48.
- [5] 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 [J]. *Water International*, 2008, 33(1): 19–32.
- [6] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade[J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15(1): 45–56.
- [7] Hoekstra A Y. The relation between international trade and water resources management [M]. Gallagher K P. *Handbook on Trade and the Environment*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2008: 116–125.
- [8] Siebert S, Doll P. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3–4): 198–217.
- [9] Hoekstra A Y. The global dimension of water governance: Nine reasons for global arrangements in order to cope with local water problems[C]//. *Value of Water Research Report Series No. 20*. Delft, Netherlands: UNESCO–IHE, 2006.
- [10] Hoekstra A Y, Chapagain A K. The water footprint of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption agricultural commodities[J]. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 143–151.
- [11] Van Oel P R, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The external water footprint of the Netherlands: Geographically – explicit quantification and impact assessment[J]. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 82–92.
- [12] Aldaya M M, Garrido A, Llamas M R, et al. Water footprint and virtual water trade in Spain[M]. Garrido A, Llamas M R. *Water Policy in Spain*. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2010: 49–59.
- [13] Aldaya M M, Martinez – Santos P, Llamas M R. Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(5): 941–958.
- [14] Kumar V, Jain S K. Status of virtual water trade from India[J]. *Current Science*, 2007, 93: 1093–1099.
- [15] Kampman D A, Hoekstra A Y, Krol M S. The water footprint of India[C]//. *Value of Water Research Report Series No. 32*. Delft, Netherlands: UNESCO–IHE, 2008.
- [16] Ma J, Hoekstra A Y, Wang H, et al. Virtual versus real water transfers within China[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2006, 361: 835–842.
- [17] Liu J, Savenije H H G. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2008, 12(3): 887–898.
- [18] Hubacek K, Guan D B, Barrett J, et al. Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: Ecological and water footprint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(14): 1241–1248.
- [19] Hoekstra A Y, Chapagain A K. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [20] Yu Y, Hubacek K S, Guan D. Assessing regional and global water footprints for the UK[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1140–1147.
- [21] Sonnenberg A, Chapagain A, Geiger M, et al. *Der Water – Fußabdruck Deutschlands: Woher stammt das Wasser, das in unseren Lebensmitteln steckt?* [M]. Frankfurt: WWF Deutschland, 2009.
- [22] Bulsink F, Hoekstra A Y, Booij M J. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(1): 119–128.
- [23] 曹建廷, 李原园. 虚拟水及其对解决我国水资源短缺问题的启示[J]. *科技导报*, 2004(3): 14–16.
- [24] 牛树海. 虚拟水分析理论和方法[J]. *华侨大学学报*, 2004, 25(3): 331–333.
- [25] Savenije H H G. *Water resource management: concept and tools*[M]. Delft, The Netherlands: IHE, 2002.
- [26] Falkenmark M. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*[J]. 2003, 358: 2037–2049.
- [27] Rockstrom J. Green water security for the food makers of tomorrow: Windows of opportunity in drought – prone savannas[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(4): 71–78.
- [28] Falkenmark M, Rockstrom J. Balancing water for humans and nature: The new approach in ecohydrology[M]. London: Earthscan, 2008.
- [29] Liu J G, Williams J R, Zehnder A J B, et al. GEPIC: Modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 94(2): 478–493.
- [30] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth – model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 497–551.
- [31] Williams J R. The EPIC model[M]. Singh V P. *Computer Models of watershed Hydrology*: Water Resources Publisher, 1995: 909–1000.
- [32] FAO. CROPWAT 8.0 model. Rome: FAO. [EB/OL].

- [2010-05-25][2012-12-20]. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html.
- [33] FAO. AQUACROP3.1 model, Rome: FAO. [EB/OL]. [2012-08-30][2013-03-19]. <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- [34] Hoekstra A Y, Chapagain A k, Aldaya M M. Water Footprint Manual: State of the Art 2009, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands [EB/OL]. [2013-03-12]. <http://www.waterfootprint.org/downloads/WaterFootprintManual2009.pdf>.
- [35] Zarate E(ed). WFN grey water footprint working group final report[M]. A joint study developed by WFN partners. Water Footprint Network, Enschede, Netherlands, 2010.
- [36] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G. The water footprints of cotton consumption: an assessment of impact of the worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. Ecological Economics, 2005, 60(1): 186 – 203.
- [37] Dabrowski J M, Murray K, Ashton P J, et al. Agriculture impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions [J]. Ecological economics, 2009, 68(4): 1074 – 1082.
- [38] Ercin A E, Aldaya M M, Hoekstra A Y. A pilot in corporate water footprint accounting and impact assessment: The water footprint of a sugar containing carbonated beverage[C]//. Value of Water Research Repots Series No. 39. Delft, Netherlands: UNESCO – IHE Institute for Water Education, 2009.
- [39] Gerbens – Leenes P W, Hoekstra A Y. The water footprint of sweeteners and bio – ethanol from sugar cane, sugar beet and maize [C]//. Value of Water Research Report Series No. 38. Delft, Netherlands: UNESCO – IHE Institute for Water Education, 2009.
- [40] Chapagain A Y, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective[C]//. Value of Water Research Repots Series No. 40, Delft, Netherlands: UNESCO – IHE, 2010.
- [41] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual Water Flows between Nations in Relation to Trade in Livestock and Live-stock Products [C]//. Value of Water Research Report Series No. 13. Netherlands, Delft: UNESCO – IHE Institute for Water Education, 2003: 11 – 15.
- [42] Aldaya M M, Allan J A, Hoekstra A Y. Strategic importance of green water in international crop trade[J]. Ecological Economics, 2010, 69(4): 887 – 894.
- [43] Gerbens – Leenes P W, Hoekstra A Y, Van der Meer T H. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio – energy in energy supply[J]. Ecological Economics, 2009, 68(4): 1052 – 1060.
- [44] Gerbens – Leenes, P W, Hoekstra A Y. Burning water: The footprint of biofuel – based transport [C]//. Value of Water Research Report Series No. 44. Delft, Netherlands: UNESCO – IHE, 2010.
- [45] Dominguez – Faus R, Powers S E, Burken J G, et al. The water footprint of biofuels: A drink or drive issue? [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9): 3005 – 3010.
- [46] Yang H, Zhou R, Liu J G. Land and water requirements of biofuel and implications for food supply and the environment in China[J]. Energy Policy, 2009, 37(5): 1876 – 1885.
- [47] Chapagain A Y, Orr S. UK Water Footprint: The Impact of the UK's Food and Fibre Consumption on Global Water Resources[M]. Godalming: WWF – UK, 2008.
- [48] 马 静, 汪党献. 水足迹在水资源研究中的应用[C]//. 中国自然资源学会 2004 年学术年会论文集. 2004: 573 – 578.
- [49] 王新华, 徐中民, 龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 774 – 781.
- [50] 高孟绪, 任志远, 郭 斌, 等. 基于 GIS 的中国 2000 年水足迹省区差异分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 131 – 136.
- [51] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 等. 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[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1312 – 1321.
- [52] 邓晓军, 谢世友, 秦 婷. 基于水足迹分析法的四川省水资源利用评价[J]. 人民长江, 2007, 38(2): 61 – 63.
- [53] 黄 晶, 宋振伟, 陈 阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6546 – 6554.
- [54] 陈俊旭, 张士锋, 华 东, 等. 基于水足迹核算的北京市水资源保障研究[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 528 – 534.
- [55] 孙义鹏. 基于水足迹理论的水资源可持续利用研究 – 以沿海缺水城市大连为例[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [56] 李 明. 长春市 1994 – 2004 年水足迹研究[D]. 吉林: 东北师范大学, 2007.
- [57] 张斌, 黄显峰, 方国华, 等. 基于水足迹理论的连云港市水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2012(6): 61 – 64.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 沈淑平, 秦丽杰. 长春市 1998 – 2008 年玉米虚拟水量动态变化研究[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(2): 152 – 156.
- [61] 项学敏, 周笑白, 周集体. 工业产品虚拟水含量计算方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(2): 179 – 184.