

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.024

水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示

黄 晶^{1,2},王学春¹,陈 阜²

(1. 西南科技大学生命科学与工程学院,四川 绵阳 621010; 2. 中国农业大学农学与生物技术学院,北京 100193)

摘要:在明确水足迹起源、概念的基础上,综合评述基于虚拟水理论的水足迹方法、生命周期评价和基于生命周期评价的水足迹方法。比较不同方法的特点及其研究意义,认为基于虚拟水理论的水足迹方法适用于区域层面,而基于生命周期评价的水足迹方法更适用于产品层面的研究;二者结合可为农业水资源可持续利用提供从区域到产品尺度的研究方法思路。

关键词:水足迹;虚拟水;生命周期评价;水资源可持续利用;进展

中图分类号:TV 213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)01-0135-07

Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water

HUANG Jing^{1,2}, WANG Xuechun¹, CHEN Fu²

(1. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China))

Abstract: Based on clear awareness of the origin and the concept of water footprint, water footprint method on the basis of virtual water-based theory, life cycle assessment (LCA) and LCA based water footprint method are comprehensively reviewed. After comparing the feature of different methods and the significance of the research, it is considered that virtual water-based theory based water footprint method can be applied in the regional level, while LCA based water footprint method is more suitable for product level. By combining these two, the research methods and tracks for sustainable utilization of agricultural water resources from the regional level to the product level are proposed.

Key words: water footprint; virtual water; life cycle assessment; sustainable water utilization; research progress

淡水资源是决定人类生存和发展的重要自然资源,目前正被过量开采利用而越来越匮乏。在人口增长、经济发展以及气候变化等因素的影响下,未来水资源匮乏问题将变得更加严重^[1]。科学评价人类活动对水资源的影响是研究如何实现水资源可持续利用的前提。水足迹的概念由荷兰学者 Hoekstra 于 2002 年提出,目前已成为国际水资源管理研究的前沿领域。水足迹研究经历了十余年的发展,其评价对象、范围等逐渐完善,同时也涌现出不同的评价方法。近年来,国内学者主要针对基于虚拟水理论的水足迹研究进展评述较多^[2-3],而没有系统地总结

基于不同理论、不同方法的水足迹研究,特别是缺乏对水足迹理论在农业水资源领域相关应用的分析。笔者系统总结水足迹的起源、概念、不同研究方法的特点、应用范围等,分析水足迹对农业水资源利用以及如何减少农业水足迹实现水资源可持续利用的启示,以期对相关研究提供参考。

1 水足迹研究进展

1.1 水足迹起源及其研究意义

水足迹(water footprint)理论最早是在虚拟水理论基础上发展起来的。虚拟水(virtual water)的概

基金项目:四川省科技厅科技支撑项目(2015NZ0083);西南科技大学博士基金(14zx7158)
作者简介:黄晶(1987—),女,讲师,博士,主要从事农业水资源可持续利用研究。E-mail: huangjing@cau.edu.cn

念由英国学者 Allan^[4]于20世纪90年代提出,被定义为生产农产品所需要的水资源。虚拟水又叫作“嵌入水(embodied water)”,指隐藏在产品背后的水资源,是相对于实体水的一个概念,其提出的初衷是为了研究贫水国家和地区如何通过从其他区域进口水资源密集型的农产品来减少水赤字。Hoekstra^[5]将虚拟水的概念进一步拓展,定义为生产商品和服务所需要的水资源数量,如1 kg 粮食的虚拟水含量为1~2 m³,1 kg 牛肉的虚拟水含量为16 m³。虚拟水的概念被量化研究后很快引起广泛关注,国内外学者均开展了系列研究^[6-7]。在虚拟水研究的基础上,荷兰学者 Hoekstra^[8]于2002年进一步提出了“水足迹”的概念,用以描述人类活动对水资源的影响,其思想源自于20世纪90年代加拿大学者提出的“生态足迹(ecological footprint)”理论。生态足迹衡量的是人类对具有生物生产力土地的占有,它表示任何已知人口(个人、城市、国家或全人类)需要多少具备生物生产力的土地和水域,来生产所需资源和吸纳所衍生的废物。水足迹衡量的是人类活动对水资源的影响,其研究对象可以是一件产品或服务,一个人,一个地区或国家等^[9]。产品或服务的水足迹是指生产该产品或服务整个过程中的水资源消耗量;个人、区域和国家水足迹是指已知人口在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源量。水足迹按其构成可以分为蓝水、绿水和灰水。蓝水指存在于江、河、湖泊及含水层中的地表水与地下水的总和;绿水指存在于土壤非饱和含水层中以蒸散的形式为植被所利用的土壤水;灰水指被污染的水资源,被定义为能将污染物稀释到可以接受的最高浓度的水资源需求量。

与虚拟水相比,水足迹具有更深层次的意义和更广泛的应用范围。首先,通常说的产品虚拟水量仅仅指用水量,而水足迹不仅仅包括用水量,还明确了用水的地点、时间以及用水类型。其次,虚拟水是一个较为笼统的概念,而水足迹可以根据研究目标的不同而设定研究界限,如,研究消费者的水足迹,可以评价消费的产品和服务的水足迹;研究生产者的水足迹,则可以评价产品和服务的生产水足迹。总的来说,水足迹是对水资源消耗和污染的定量化评价,从空间和时间上明确了人类对水资源的真实占用情况。近年来,相关研究一般均使用水足迹的概念,但涉及产品贸易时仍保留虚拟水的概念。

1.2 基于虚拟水理论的水足迹研究进展

在定量评价全球作物产品与畜禽产品贸易虚拟水的基础上,Chapagain 等^[10]对全球210个国家和地区1997—2001年的水足迹进行了计算,首次较为

系统地报道了各个国家(地区)的水足迹及因贸易产生的国家(地区)间虚拟水流,并初步分析水足迹与国民收入、气候、消费结构、作物产量等的关系。Hoekstra 等^[11]进一步从生产角度与消费角度计算了全人类的水足迹,指出消费者水足迹的大小主要取决于其消费量以及消费结构。该研究对于消费者、生产者、媒介者(如产品加工者和零售商)以及政府部门如何在关键环节减少水足迹具有重要的启示。不同学者进一步从国家、流域或省域尺度对特定区域水足迹进行了更为详细的研究^[12-14]。这些研究从不同的尺度初步明确了区域生产和消费活动对水资源的影响,及区域水足迹与国内生产总值、人类生活方式、作物种植结构等的关系,并且结合区域水资源背景提出了消费方式转变、虚拟水贸易、农业结构调整等减少水资源匮乏地区水足迹的措施。关于产品水足迹的研究,Mekonnen 等^[15-16]对全球主要作物产品与主要畜禽产品水足迹进行了计算,这两项研究是目前对作物产品和动物产品水足迹最为综合、详细的报道。此外,关于不同国家、不同地区的小麦、水稻等作物产品^[17-18]以及畜肉、禽肉、奶类等动物产品^[19-20]的水足迹评价也不断被报道。除作物、动物产品外,水足迹评价还涉及其他日常消费品及工业产品^[21-22]。此外,水足迹的研究对象还可以是一种行为、一项活动等^[23-24]。

总的来说,不同尺度的水足迹研究,对象和意义不同,应用范围也不一致。区域尺度的水足迹评价可以明确区域水足迹构成及其影响因素,为区域水资源管理、农业结构调整、虚拟水贸易等政策的制定提供参考;产品尺度的水足迹评价可以揭示不同产品以及同种产品不同产地全生命周期过程中耗水与污染水的数量,为产品设计、绿色制造、供应链风险管理等提供参考;消费者消费行为、商业活动等的水足迹评价可以揭示某项行为或活动对水资源数量与质量的影响,提高消费者和企业减少水足迹的社会责任意识。

水足迹研究的初期阶段,主要是进行区域、产品等的水足迹核算。然而,水足迹作为衡量人类对水资源占有情况的指标,其数值的大小并不能直接反应水资源利用是否可持续。Hoekstra^[25]首次提出水足迹的研究不仅应包括水足迹计算,还应进行可持续性分析,即明确水足迹数量代表什么意义,哪个环节或哪些地区是需要关注的热点,需要采取何种措施以种缓解水资源压力。Van Oel 等^[26]计算了荷兰的外部水足迹,并评价了其外部水足迹对虚拟水供应国的影响;荷兰的总水足迹中有89%为外部水足迹,其外部水足迹来源最大的国家是德国、法国、比

利时等欧洲国家,但其影响最大的国家是中国、印度、西班牙等国,因为这些国家水资源相对匮乏。Chapagain 等^[27]的研究表明,英国的水足迹自给率仅为 38%,其余为外部水足迹。Chapagain 等^[27]研究分析英国外部水足迹供应国的水资源供需情况,并提出减少英国国内外水足迹影响的措施。可口可乐公司对其产品原材料——糖的水足迹可持续性进行了评价^[28],指出可口可乐 10 个糖原料供应地中,西班牙、希腊的水足迹呈严重不可持续状态,其他地区如法国、比利时等地水足迹的影响较小。近年来,国外关于水足迹可持续性评价的研究逐渐增多,国内的研究大多是进行不同尺度水足迹核算^[29-30],而对可持续性评价及降低水足迹具体措施的研究较为薄弱^[31]。

1.3 生命周期评价和基于生命周期评价的水足迹研究

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是评估一个产品全生命周期过程的环境因素及潜在环境影响的工具,最早可以追溯到 19 世纪 60 年代可口可乐公司对其不同容器的资源消耗和环境排放所做的特征分析^[32]。随着人们对资源和环境问题的关注,LCA 方法在全球范围内得到大规模应用,国际标准化组织制定和发布了 ISO14040 系列标准。由于 LCA 方法早期主要应用于对水资源依赖程度较小的工业部门,其评价体系通常不考虑水资源,或仅仅报道部门的总用水量。近年来,随着 LCA 在各行业的应用,众多学者提出应在其评价体系中系统报道水资源利用量并进行相应的影响评价^[33-34]。MiLA i Canals 等^[35]系统地介绍了 LCA 评价体系中如何进行用水清单分析,包括如何区分和量化蓝水、绿水以及土地利用形式变化对水资源数量的影响;影响评价包括评价对生态系统的影响与对资源消耗的影响。Pfisher 等^[36]提出在用水清单分析阶段除了水资源消耗分析外还应包括水资源污染分析,影响评价包括评价对人类健康的影响、对生态系统的影响以及对资源消耗的影响。在联合国环境规划署-环境毒理学和化学学会(UNEP-SETAC)的资助与推动下,其他学者也从清单分析、影响评价等不同层面研究了如何在 LCA 中科学地分析水资源问题^[37-38]。

完整的生命周期评价,既考虑水资源消耗又考虑水资源污染,不可避免地涉及一系列环境机制,其结果通常被报道为清单式的水生命周期影响分类指标^[35]。对于从事 LCA 的专业人士,在有机会向其服务对象(如决策者)详细解释结果的时候,进行完整、清晰、充分的指标分析是非常有效和必要的。但

如果 LCA 结果的受众是缺乏相关知识的普通消费者,清单式的评价结果往往不易被接受。这种情况下,向受众提供简单、易被理解的单一指标就非常有必要。有学者提出水足迹应像碳足迹一样,采用单一值进行报道。但基于虚拟水的水足迹仅仅报道水资源消耗与污染量,存在一定缺陷^[39]。Ridoutt 等^[39]在对玛氏食品公司生产的两种产品——花生酱和面酱进行水足迹计算时,发现基于虚拟水的水足迹评价方法存在以下问题:首先,产品水足迹没有与水资源的其他用途(即不生产该产品时水资源的用途)联系起来;其次,产品水足迹没有与其潜在的社会、环境危害联系起来。例如,250 g 花生酱水足迹(1153 L)比 575 g 面酱水足迹(202 L)高出近 5 倍,但面酱水足迹构成中 63.3% 均为蓝水,花生酱中 85.7% 均为绿水。由于水足迹构成的不同,产品生产对水资源的影响也不同,不能简单地将不同成分相加。随后,Ridoutt 等^[37]提出了基于生命周期评价思想的产品水足迹计算方法,认为绿水和蓝水的机会成本不同,不应直接作为水足迹的构成,但是土地利用形式决定了绿水转化为地表水和地下水的数量,因此应考虑土地利用形式对蓝水资源的影响。此外,由于地域差异,产品生产对不同地区的影响是不同的,因此该方法引入了水资源压力指数(water stress index, WSI)^[40],对产品水足迹进行修订,使最终结果呈现的水足迹不再是实体水量,而是水当量(H₂O-equivalent)。仍以 250 g 花生酱和 575 g 面酱为例,该方法计算出的面酱水足迹为 133.9 L 水当量,花生酱的水足迹为 4.1 L 水当量,直接体现出两种成分、产地(包括成分产地)不同的产品,生命周期对水资源的影响。基于 LCA 的这一方法,其最明显的特征是便于不同产品以及同一产品不同生产阶段的水足迹比较,可以为产品生产者提供定量的单一指标以便选择原材料。该方法将产品生产和其对环境的影响联系起来,可以作为生产者提供产品生产水资源可持续性报道的依据。

Ridoutt 等^[40]认为水足迹的概念根据不同的应用领域具有不同的研究意义。对于产品层面来说,水足迹应该描述水资源消耗的潜在影响,而不是简单报道数量,以作为可持续生产和消费的驱动指标;对于流域层面来说,水足迹是该流域内各机构水资源利用和排放的账户,每个账户本身就是水足迹,它的评价只有在考虑流域本身的水资源可持续情况以及和与其他用水账户的联系才有意义;对于国家或地区层面来说,水足迹主要用于明确农业和贸易政策对水资源的影响,高耗水型农产品应该在水资源充足的地区生产并通过贸易输送到水资源匮乏的国

家和地区。Ridoutt 等^[41] 比较了澳大利亚新南威尔士州旱地和水浇地小麦水足迹,结果表明该州不同区域小麦生产水足迹差异高达 150 倍,灌溉对水资源造成较大压力但提高了土地生产效率;对牛肉生产的研究发现,由于不同生产系统的水资源匮乏程度不同,牛肉水足迹存在较大差异(3.3 ~ 221 L/kg 水当量),因此不能一概而论地认为肉禽类产品的水足迹一定高于作物类产品^[42]。

基于 LCA 的水足迹方法在不断发展完善,如 Ridoutt 等^[43] 对评价体系中关于水资源污染的计算方法作了改进。目前,国内未见采用完整的生命周期评价研究人类生产和消费活动对水资源影响的相关报道;除包括作者在内的少数学者采用基于生命周期评价思想的方法开展了相关研究外^[31, 44], 尚未见国内其他学者采用这一方法进行相关研究。

1.4 水足迹评价方法小结

综上所述,目前水足迹评价方法主要有基于虚拟水的评价方法(virtual water-based)、生命周期评价法(LCA)和基于生命周期评价的方法(LCA-based)。Berger 等^[45] 把这些方法归纳为两大类:基于数量(Volumetric-oriented)评价的方法以及基于影响(Impact-oriented)评价的方法。前者主要评价生产和消费活动对全球水资源量的占用,后者主要评价生产和消费活动对水资源占用的后果(即影响)。Berger 等^[45] 认为只报道数量的水足迹容易对消费者和决策者造成误导,基于影响评价的水足迹更有实际意义。尽管目前国际上尚未达成一致的水足迹评价标准,但多数学者认为将水资源消耗、污染与其环境影响联系起来的水足迹评价方法更有意义^[20, 36, 40]。为制定国际统一的水足迹评价方法,国际标准化组织成立了专门的工作小组,制定了水足迹国际标准(ISO 14046:2014)。该标准制定的评价方法是建立在生命周期评价方法基础上,评价对象为产品、过程与社会团体,评价结果为单一指标或者详细的影响评价清单。

2 对农业水资源利用的启示

水足迹研究的核心问题是要解决如何减少水足迹以实现水资源的可持续利用。据报道,全球农业每年用水占到淡水资源总用量的 85%,灌溉用水约占总用水的 70%^[46],我国农业灌溉用水约占总用水量的 60% ~ 70%^①。然而,传统的农业水资源利用评价主要考虑以灌溉形式被消耗的地表水和地下水,不能真实反映农业对包括绿水资源在内的水

资源消耗以及农业生产污染物排放对水资源造成的污染。如果从农产品生产全生命周期考虑水资源消耗与污染,农业用水占区域水资源总用量的比例会更大。随着水资源匮乏问题的加剧,降低农业生产水资源代价越来越重要,也存在着巨大潜力。水足迹理论为研究农业水资源可持续利用提供了新思路。

2.1 农业水足迹核算

目前水足迹的评价方法较多,研究农业生产水足迹既涉及区域尺度,又涉及产品尺度。区域尺度农业水足迹核算需明确区域水资源的真实占用、农业水资源消费的内部性和外部性以及区域农业生产水足迹的时空特点,基于虚拟水理论的水足迹评价方法(如 Hoekstra 等^[9] 的方法)适用于该层面的研究;由于区域农业生产用水通过农产品贸易和其他地区联系在一起,核算农产品水足迹需考虑农产品生产的区域水资源匮乏程度,以进行不同产地农产品间水足迹的比较,因此产品尺度的水足迹评价适宜采用基于生命周期评价的单一指标法(如 Ridoutt 等^[43] 的方法及 ISO 14046:2014 的单一指标法)。然而,无论研究何种尺度的农业水足迹,科学核算作物生产的水资源消耗和污染是前提。在农田尺度上,通过田间定位试验能较为精确测算作物绿水消耗、蓝水消耗,以及化肥、农药等污染物排放对水体造成的污染。然而,在水文、生态过程比较复杂的情况下,如何进行大空间尺度(如省份、流域等)作物水资源消耗与污染的测算仍是水足迹研究的难点。水足迹研究初期,国内外计算区域作物生产绿水、蓝水消耗量时多采用作物生长模型与水文模型模拟作物绿水、蓝水蒸散量^[10],计算结果多为理论值,与实际值存在一定差异。随着研究的深入,结合遥感手段估算作物生长季实际绿水、蓝水蒸散量的研究越来越多,测算结果的时空分辨率不断提高^[17]。但是,如何综合考虑作物生长真实消耗的绿水、蓝水以及流域内灌溉量、田间损失量,即将作物水资源消耗纳入区域水分循环的整体框架,仍然是研究的一大难点,相关工作还有待深入。此外,由于受到数据的限制,目前关于污染水足迹的核算大多仅仅考虑作物种植过程中氮的淋失,结果较为粗放。未来如何在区域大尺度获得可靠的包括氮、磷、农药等在内的污染物排放数据以及科学核算相应的水资源污染量,还需进行深入研究。

2.2 降低农业水足迹的途径

Ridoutt 等^[47] 对 11 050 个水域用水量的研究发现,全球绝大部分用水量发生在水资源压力指数高

① 根据《中国水资源公报》(1997—2011)整理计算。

于 0.9 的水域,表明目前人类对水资源消费的格局呈严重的不可持续状态。因此,降低水足迹,首先应考虑减少水资源压力指数较高地区的水足迹。农业生产亦是如此,如何通过调整种植结构来改变不合理的生产布局,是减少农业水足迹的重要措施。我国水资源分布不均,目前水资源消费格局也呈严重的不可持续状态。近年来,我国粮食生产的重心由南方的长江流域、珠江流域等转移到了北方的海河流域、黄河流域等。华北平原水资源匮乏指数接近 1,水资源总量不足全国总量的 6%,却生产了占全国总量 31% 的粮食^[48]。目前正实施的南水北调工程,完全竣工后用于农业及生态的用水量约为 225 亿 m³,而由北方向南方输入的粮食虚拟水量高达 523 亿 m³^[49]。如果将粮食虚拟水量折算成与环境影响相联系的水足迹,则从水资源匮乏的北方调出的粮食水足迹远远高于南水北调工程从水资源相对充足的南方地区调出的水足迹。可见南水北调工程相对于目前水资源消费的环境影响而言是杯水车薪,要缓解目前华北平原的水资源压力,国家层面上的农业生产结构调整是关键。对于一个地区而言,种植结构调整既要考虑降低本地农产品生产的水资源影响,同时要考虑相关措施对区域以外其他地区水资源的影响^[31]。除了从宏观上改变不合理的用水结构、减少农业水足迹外,还要重视从微观上减少水资源的浪费和污染,而农田尺度的水、肥等利用效率的提高是关键。

3 结 语

水足迹理论从区域到产品尺度,为农业水资源优化利用研究提供了新思路。反过来,农业水资源的优化利用对降低人类水足迹具有重要意义。而降低人类水足迹以实现水资源的可持续利用,正是水足迹理论研究的最终目标。

参考文献:

[1] VÖRÖSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth [J]. Science, 2000, 289: 284-288.

[2] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展 [J]. 生态学报, 2013, 33 (18): 5458-5466. (MA Jing, PENG Jian. Research progress on water footprint [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5458-5466. (in Chinese))

[3] 周玲玲, 王琳, 王晋. 水足迹理论研究综述 [J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24 (5): 106-111. (ZHOU Lingling, WANG Lin, WANG Jin. Review on study of water footprint theory [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24 (5): 106-111. (in

Chinese))

[4] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [C]//Prioritied for water resources allocation and management. London: ODA, 1993.

[5] HOEKSTRA A Y. Perspectives on water: a model-based exploration of the future [M]. Netherlands: International Books, 1998.

[6] HOEKSTRA A Y, HUANG 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. 11. Delfe: UNESCO-IHE, 2002.

[7] 曹建廷, 李原园, 张文胜, 等. 农畜产品虚拟水研究的背景、方法及意义 [J]. 水科学进展, 2004, 15 (6): 829-834. (CAO Jianting, LI Yuanyuan, ZHANG Wensheng, et al. Research background, methodological issues and significance on virtual water of crop and livestock production [J]. Advances in Water Science, 2004, 15 (6): 829-834. (in Chinese))

[8] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The Water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.

[9] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.

[10] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations [C]//Value of water research report series No. 16. Delfe: UNESCO-IHE, 2004.

[11] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(9): 3232-3237.

[12] DONG H, GENG Y, FUJITA T, et al. Uncovering regional disparity of China's water footprint and inter-provincial virtual water flows [J]. Science of the Total Environment, 2014, 500/501: 120-130.

[13] ERCIN A E, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The water footprint of France [C]//Value of water research report series No. 56. Delfe: UNESCO-IHE, 2012.

[14] 魏晓燕, 毛旭锋, 吴燕红. 基于水足迹的湿地生态需水保障对策 [J]. 水资源保护, 2013, 29(2): 82-94. (WEI Xiaoyan, MAO Xufeng, WU Yanhong. Safeguarding eco-environmental flows of Baiyangdian wetlands: a strategy based on water footprints [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 82-94. (in Chinese))

[15] 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.

[16] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products [J]. Ecosystems, 2012, 15(3): 401-415.

- [17] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7) :1259-276.
- [18] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(4) :749-758.
- [19] GERBENS-LEENES W, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y, et al. A comparative study on the water footprint of poultry, pork and beef in different countries and production systems [C]//Value of water research report series No. 55. Delfe; UNESCO-IHE, 2011.
- [20] ZONDERLAND-THOMASSEN M A, LEDGARD S F. Water footprinting-a comparison of methods using New Zealand dairy farming as a case study [J]. *Agricultural Systems*, 2012, 110:30-40.
- [21] ERCIN A E, ALDAYA M M, HOEKSTRA A Y. Corporate water footprint accounting and impact assessment: the case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(2) :721-741.
- [22] van OEL P R, HOEKSTRA A Y. Towards quantification of the water footprint of paper: a first estimate of its consumptive component [J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(3) :733-749.
- [23] GERBENS-LEENES W, HOEKSTRA A Y. Business water footprint accounting [C]//Value of water research report series No. 27. Delfe; UNESCO-IHE, 2008.
- [24] GERBENS-LEENES W, HOEKSTRA A Y. The water footprint of biofuel-based transport [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(8) :2658-2668.
- [25] HOEKSTRA A Y. Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints [C]//Value of water research report series No 28. Delfe; UNESCO-IHE, 2008.
- [26] VAN OEL P R, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The external water footprint of the Netherlands: Quantification and impact assessment [C]//Value of water research report series No 33. Delfe; UNESCO-IHE, 2008.
- [27] CHAPAGAIN A K, ORR S. UK Water Footprint: The impact of the UK's food and fibre consumption on global water resources [M]. Godalming, UK: World Wide Fund for Nature, 2008.
- [28] COCA-COLA EUROPE. Water footprint sustainability assessment: towards sustainable sugar sourcing in Europe [R]. Belgium: The Coca-Cola Company, 2011.
- [29] 吴普特, 王玉宝, 赵西宁. 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告 [R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 86-89.
- [30] 高太忠, 庞会从, 余国山, 等. 虚拟水理论在河北省的应用 [J]. *水资源保护*, 2010, 26 (3): 79-86. (GAO Taizhong, PANG Huicong, YU Guoshan, et al. Application of virtual water theory in Hebei Province [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26 (3): 79-86. (in Chinese))
- [31] 黄晶. 基于水足迹的北京市农业水资源可持续利用研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- [32] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent developments in life cycle assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91 (1): 1-21.
- [33] OWENS J W. Water resources in life-cycle impact assessment: considerations in choosing category indicators [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2002, 5: 37-54.
- [34] HEUVELMANS G, MUYS B, FEYEN J. Extending the life cycle methodology to cover impacts of land use systems on the water balance [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005, 10: 113-119.
- [35] MÍLA Ì CANALS L, CHENOWETH A, CHAPAGAIN S, et al. Assessing freshwater use in LCA: Part I—inventory modelling and characterization factors for the main impact pathways [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 14: 28-42.
- [36] PFISHER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43 (11): 4098-4104.
- [37] BOULAY A M, BOUCHARD C, BULLE C, et al. Categorizing water for LCA inventory [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(7) :639-651.
- [38] BOULAY A M, BULLE C, BAYART J B, et al. Regional characterization of freshwater use in LCA: Modelling direct impacts on human health [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(20) :8948-8957.
- [39] RIDOUTT B G, EADY S J, SELLAHEWA J, et al. Water footprinting at the product brand level: case study and future challenges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(13) :1228-1235.
- [40] RIDOUTT B G, PFISTER S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity [J]. *Global Environmental Change*, 2010, 20 (1): 113-120.
- [41] RIDOUTT B G, POULTON P L. Dryland and irrigated cropping systems: comparing the impacts of consumptive water use [C]//Proceedings of the Seventh International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector. Bari: Università degli Studi di Bari Aldo Moro, 2010: 153-158.
- [42] RIDOUTT B G, SANGUANSRI P, FREER M, et al. Water footprint of livestock: comparison of six geographically-defined beef production systems [J]. *International*

Journal of Life Cycle Assessment,2011,17:165-175.

[43] RIDOUTT B G, PFISTER S. A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone indicator [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2013,18:204-207.

[44] HUANG J, RIDOUTT B G, ZHANG H, et al. Water footprint of cereals and vegetables for the Beijing market: comparison between local and imported supply [J]. Journal of Industrial Ecology,2014,18(1):40-48.

[45] BERGER M, FINKBEINER M. Methodological challenges in volumetric and impact-oriented water footprints [J]. Journal of Industrial Ecology,2013,17(1):79-89.

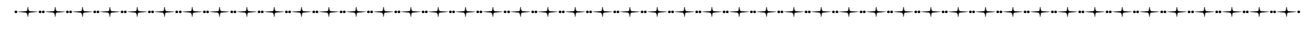
[46] UNESCO. Water: a shared responsibility [EB/OL] [2006-12-30] <http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr2/>.

[47] RIDOUTT B G, PFISTER S. Reducing humanity's water footprint [J]. Environmental Science and Technology, 2010,44:6019-6021.

[48] 李保国, 彭仕琪. 1998—2007 年中国农业用水报告 [R]. 北京: 中国农业出版社, 2009.

[49] 吴普特, 赵西宁, 操信春, 等. 中国“农业北水南调虚拟工程”现状及思考 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 1-6. (WU Pute, ZHAO Xining, CAO Xinchun, et al. Status and thoughts of Chinese “Agricultural North-to-South Water Diversion Virtual Engineering” [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 1-6. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-08-15 编辑: 彭桃英)



(上接第 124 页)

a. 扩大芦苇湿地的 3 类方式。①沿岸水域新增芦苇湿地, 范围是沿湖岸 400 ~ 800 m 宽水域。②在确保防洪安全和在条件成熟的情况下恢复部分环湖大堤背水侧芦苇湿地。如拆除湖上游的派河与杭埠河之间 20 km 环湖大堤的一部分, 或在大堤上开启若干个有相当截面的口子, 其上架设桥梁满足防洪交通之需, 使环湖大堤内外水体适当流动, 大堤背水侧的低洼区恢复芦苇湿地。③在不影响用水和航行情况下适当降低冬春季水位。如降低 0.5 ~ 0.8 m, 利于春天芦苇发芽生长和种植, 利于扩大沿岸芦苇湖滩湿地。

b. 生态修复与景观建设密切结合。巢湖岸线均基本规划为风景区域, 其西北部湖滨区域已开始实施, 部分已完成。景观水域可根据水深等条件合理搭配种植包括芦苇在内的挺水、沉水、浮叶等植物和设置生态浮岛(浮床), 满足景观多样性要求, 并合理解决芦苇与蓝藻共存问题。修复沉水植物为主的水域则应在改善风浪、蓝藻暴发、透明度等诸多生境后建成相对封闭水域, 再种植以本地品种为主的沉水植物, 并注意长期管护和适时调整植物结构。建设好湖岸生态边坡。实行人工修复与自然修复结合, 人工修复促进自然修复。

参考文献:

[1] 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 安徽省巢湖管理局. 2013 巢湖健康状况报告 [R]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2014.

[2] 朱喜, 胡明明, 孙阳, 等. 中国淡水湖泊蓝藻暴发治理与预防 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

[3] 安徽省人民政府. 巢湖流域水环境综合治理总体方案 [R]. 合肥: 安徽省人民政府, 2009.

[4] 谢平. 翻阅巢湖的历史 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

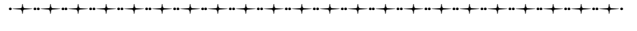
[5] 中国统计局. 中国统计年鉴 2012 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

[6] 环境保护部. 重点流域水污染防治规划 (2011—2015 年) 附件 [R]. 北京: 环境保护部, 2012.

[7] 王鸿涌, 张海泉, 朱喜, 等. 太湖蓝藻治理创新与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

[8] 谢平. 鲢、鳙鱼与藻类水华控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(收稿日期: 2015-04-10 编辑: 徐 娟)



大型专业辞书《水利大辞典》出版发行

一部系统介绍当代水利科学技术的大型专业辞书《水利大辞典》, 在纪念水利高等教育百年、河海大学百年校庆的前夕正式发行了。这是进入 21 世纪以来, 我国总结水利科技发展、普及水利科技知识、传承水利科技文化的又一标志性力作。

《水利大辞典》是一项充分体现河海大学专业特色的文化工程, 由河海大学组织学校相关学科教师百余人精心编纂修订, 姜弘道教授、唐洪武教授担任执行主编。该辞典专业面宽、参编人员多、十分耗时费力, 有近 60 位河海大学各学科的学术带头人、学术骨干参加了编撰和修订; 有 80 位专家, 包括特聘的校外专家, 参加了三轮审稿。参与编撰的专家学者严谨治学、字斟句酌、反复推敲、认真审订, 为保证和提升《水利大辞典》的编纂质量发挥了关键性的作用。

《水利大辞典》购买联系地址: 200040, 上海市静安区陕西北路 457 号, 上海辞书出版社; 电话: 021-62676853

(本刊编辑部供稿)