

魏宇航,唐德善. 农业水足迹与水资源配置模型[J]. 江苏农业科学,2016,44(2):375-377.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.02.109

农业水足迹与水资源配置模型

魏宇航, 唐德善

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:现代社会自然水循环和社会水循环密不可分,人造水利工程影响着自然水循环,也间接影响产品水足迹。针对以往水足迹研究重评价、轻计划的问题,提出将农业水足迹纳入水资源配置模型框架的基本方法,以流域产品加工及水利工程的总水足迹最小作为控制目标,以流域经济社会发展要求作为约束条件,从而能在规划阶段就让水足迹方法发挥作用。针对水利工程建设运行中的水消耗,提出水利工程水足迹的概念和计算方法,并将其纳入水资源配置模型,从而实现流域水利工程布局和作物种植方案的优化。

关键词:水足迹;水利工程;水资源配置;优化模型

中图分类号:TV212 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)02-0375-03

水资源是维系社会经济健康稳定协调发展的关键性资源。当今社会,伴随着全球气候变化、经济高速发展、人口增加以及城市化进程,水问题日渐突出,水资源短缺日益尖锐,水环境恶化日趋普遍。如何合理配置、高效利用、充分保护水资源,已经成为全球性热点问题。从 20 世纪 40 年代美国学者 Masse 提出的水库优化调度问题开始,从单一水库到多水库,从单纯的蓄水发电目标到经济社会生态多目标,从注重水量到水质水量联合调配,人类逐渐探索充分发挥水资源经济、社会、生态效益的调度、配置方法。水资源优化配置,是协调不同地区、产业之间水资源利用的工作,常以经济、社会、生态中的某 1 个或多个指标作为目标函数,以水量等作为约束条件,通过最优化方法,获得效益最大的水资源分配方案。水资源优化配置的结果是制定水管理政策的基础。

另一种考虑水资源利用效率的方式则是虚拟水,或者说水足迹的方式。从 20 世纪 90 年代 Allan 提出虚拟水^[1],到 2002 年 Hoekstra 等提出水足迹^[2],到中国提出的直接用水系数和完全用水系数^[3],这些方法都通过简单或复杂的供应链分析方法,是度量产品生产过程中水的消耗和利用的指标。水足迹指示产品生产全过程中水的消耗^[4],水足迹概念的提出使得水资源的消耗利用和某一具体产品之间建立了明确的定量关联。例如,生产 1 kg 玉米时玉米植株蒸散发消耗的水,生产畜产品时牲畜的直接饮水、牧草生长所需要的水。水足迹考虑整个产品生产过程的耗水;面对产品生产的地区、国际性分工,水足迹等理论也注重考虑产品生产的区内、区外用水,通过这一划分,实质在研究国家间、区域间水资源利用效率的水量水质调配^[5]。

通过农业科学研究以及气象、作物需水模拟软件,如 CropWat、AquaCrop 软件,已经能较为精确地分析某一地区某种作物生长全过程的蒸散发^[6],估算出其水资源消耗,利用当年作物产量信息估计出单位质量作物生产所需要的水资源-水足迹。通过分析历史气象资料和作物产量以及对比不同区域作物水足迹,能够进一步分析作物水足迹的时空变异^[7],进一步反思过去采取的水资源管理策略,认识到不同地区生产同种作物时用水效率的差别,从而可能通过粮食贸易方法,促进区域间水资源利用更高效^[8-10]。

但从某种程度上讲,以往的分析仍然是较为静态、孤立的。水足迹进行的产品供应链追溯,通常有一个终点。换言之,水足迹分析有一个常见的假定,即水会出现在需要耗水的地方,这类分析只关注了田间过程。在雨养农业区,这种分析可能是相对充分和全面的;但是当今世界水循环的另一大突出特点,就是自然水循环和人工水循环的交互作用^[11],在自然界的海陆水循环、陆地水循环、海洋水循环的基础上,人类修建了各种蓄水、引水、提水工程,以及输水渠道、农业灌渠、城市供排水管网,利用这些工程来满足人类生产生活需要,笔者在之前的研究中证明这些工程对于天然水循环模式及作物水足迹产生了显著影响^[12]。正是由于这种影响,在利用水足迹进行水资源配置时将面临一个困难,即是将作物水足迹最小和最大的地区视为热点地区,认为水足迹大的地区应该减少某种作物的生产,而水足迹较小的地区应该增加某种作物的生产,前提是不考虑土地、劳动力、经济社会发展水平。然而,从水足迹较大的地区往水足迹较小的地区调水时,这种策略是否仍然合理?

综上,笔者认为当前水足迹理论还面临 2 大问题:一是不同区域同种作物的水足迹有差别,但是某区域各作物水足迹加和不具备明确物理意义,因为不具备水足迹最大或最小的约束条件;二是水足迹分析框架和传统的水资源配置理论相对独立,相容性较差,虽然各自能够给出提高水资源利用效率的手段,但作为不同视角的分析手段,目前水足迹不能很好地融入水资源配置模型中,而后者是制定水资源管理政策的基础。本研究探讨了水利工程水足迹的概念和计算方法,建立

收稿日期:2015-03-18

基金项目:国家留学基金委项目(编号:201506710065);中央高校基本科研业务费项目(编号:2015B33714)。

作者简介:魏宇航(1990—),男,山东临沂人,博士研究生,主要从事水资源规划与利用研究。E-mail:hhuweiyu@163.com。

通信作者:唐德善,教授,研究方向为水资源规划与利用、技术经济等。E-mail:tds808@163.com

基于水足迹的水资源配置模型,将某流域或区域生产同样产品的水足迹最小作为目标函数,以经济社会发展要求和工程实际情况作为约束,以期为水资源配置和水资源管理提供更有效的支撑。

1 水利工程水足迹的概念与计算

产品的水足迹是指生产某种产品全过程中水的消耗。企业水足迹是指企业从事生产活动时采用材料水足迹和相关生产加工过程中水消耗的总和。根据这些概念,笔者认为水利工程水足迹应定义为为了实现蓄水、引水、提水等水利工程项目,水利工程运行中因蒸发、渗漏等原因消耗的水资源,因提水等活动消耗的能源水足迹以及水利工程建设本身需要材料中的水足迹,以及施工直接用水等水消耗的总和。

水利工程水足迹 Wf_{eng} ($m^3/年$) 计算可分为工程建设期水足迹 $Wf_{eng,con}$ (m^3) 和运行期水足迹 $Wf_{eng,ope}$ ($m^3/年$) 计算。

$$Wf_{eng} = \frac{Wf_{eng,con}}{T} + Wf_{eng,ope} \quad (1)$$

式中: T 代表工程服务期,是将工程建设期水足迹划分到每年的因子。

1.1 建设期水足迹

建设期水足迹可分为直接水足迹和间接水足迹。直接水足迹是在工程建设过程中的直接用水,间接水足迹是工程建设所需材料的产品水足迹。对于大部分产品来说,直接水足迹都较小,对于水利工程来说,也可主要考虑间接水足迹。参考常见的工程量指标,本研究选择最主要的土石方和混凝土方材料来考虑工程间接水足迹。

$$Wf_{eng,con} = Wf_{soi} \cdot Q_{soi} + Wf_{ccre} \cdot Q_{ccre} + Wf_d \quad (2)$$

式中: Q_{soi} 是工程开挖或填筑的土石方量, m^3 ; Wf_{soi} 是单位土石方量的水足迹,主要考虑土石方开挖填筑过程消耗燃料的水足迹, m^3/m^3 ; Q_{ccre} 是工程浇筑的混凝土量, m^3 ; Wf_{ccre} 为单位混凝土方量的水足迹, m^3/m^3 ; Wf_d 为工程建设期的直接用水, m^3 。

混凝土是一种人工材料,浇筑不同强度的混凝土有不同配比。常见混凝土配比下表 1。

表 1 常见混凝土配比				
强度	生产 1 m^3 混凝土所需材料质量 (kg)			
	水	水泥	沙	石子
C20	175	343	621	1 261
C25	175	398	566	1 261

沙、石子均是天然材料,水足迹为 0,本研究忽略其加工运输过程的水足迹。生产水泥基本也采用天然材料,因此生产水泥的材料水足迹为 0。在加工过程中用水主要是为了降温,因此产生灰水足迹(热污染),但不产生蓝水足迹(用水量),其水足迹主要考虑生产用电。以某水泥厂为例,年产 105 万 t 水泥熟料,共使用 50 万 m^3 水,生产 1 t 熟料用电 100~200 kW·h,由此可以估算出 C25 混凝土的水足迹是 0.374 t/m^3 。

1.2 运行期水足迹

运行期水足迹包括蒸发、渗漏及调水工程所需能源的水足迹。

$$Wf_{eng,ope} = Wf_{los} + Wf_{ele} \quad (3)$$

式中: Wf_{los} 是蒸发和渗漏引起的输水损失水足迹, $m^3/年$; Wf_{ele} 是水利工程泵站提水消耗能源的水足迹, $m^3/年$ 。

1.2.1 蒸发和渗漏 对于水利工程系统来说,修建水库引起的额外蒸发、渗漏或输水渠道、管道的蒸发、渗漏是考虑工程效率必不可少的因素。

由于本研究关注工程宏观层面上的水足迹,因此将蒸发、渗漏合并成供水损失进行较粗略的计算。

$$Wf_{los} = (1 - \eta) Q \quad (4)$$

式中: η 表示工程的输水效率,即有效送达目标断面的水与初始引入水的比值,可根据工程实际运行数据处理后获得,也可根据同地区同类工程估计; Q 代表工程的年输水量, $m^3/年$ 。

1.2.2 能源 在长距离调水时,有时须使用泵站来供水。因此在计算工程水足迹时,必须考虑抽水的电力系统的水足迹。可按照下式进行计算:

$$Wf_{ele} = \sum_{i=1}^s \varepsilon_s Q_{ele} Wf_s \quad (5)$$

式中: s 代表不同的电力来源; ε_s 代表国家供电网络中 s 能源所占比例; Q_{ele} 代表工程的年用电量; Wf_s 代表第 s 种能源的单位能源水足迹^[13]。

2 基于水足迹的流域水资源配置模型

基于水足迹的流域水资源配置模型不再将水量作为约束条件,社会经济生态目标作为目标函数。本研究提出将区域的产品产量作为约束条件,将水足迹最小作为目标函数。

2.1 节约用水目标

节约用水目标是指满足区域生产用水需求的前提下,各产业部门用水所建水利工程的总水足迹最小。该目标函数以水足迹作为用水指标,可以反映区域各项生产活动对自然水循环的总扰动程度。数学表达如下式:

$$F = \min Wf = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K Wf_{ijk} + \sum_{l=1}^p Wf_{eng,l} \right\} \quad (6)$$

式中: F 是节约用水的目标函数; Wf 为水足迹控制目标,即区域的总水足迹, $m^3/年$; i 表示流域中第 i 个子区,共有 n 个; j 表示流域中的第 j 个用水部门,共有 m 个; k 表示第 k 种产品,共有 K 个; l 表示第 l 个水利工程,共有 p 个; Wf_{ijk} 为 i 分区 j 用水部门生产 k 产品的总水足迹, $m^3/年$; $Wf_{eng,l}$ 为第 l 个水利工程的工程水足迹, $m^3/年$ 。

2.2 约束条件

社会生产约束见下式。

$$Y_{ijk} > YL_{ijk} \quad (7)$$

式中: Y_{ijk} 表示 i 区 j 用水部门生产的 k 产品产量; YL_{ijk} 表示社会需要的该产品最低生产量。

水库库容上限、下限约束见下式。

$$V_{min} \leq V_t \leq \min \{ V_{max}, V'_{max} \} \quad (8)$$

式中: V_{min} 表示水库的死库容,万 m^3 ; V_t 表示水库 t 时段的蓄水量,万 m^3 ; V_{max} 表示水库的兴利库容,万 m^3 ; V'_{max} 表示水库的防汛限制库容,万 m^3 。

输水能力约束见下式。

$$WR_{ij} \leq Q_{ij} \quad (9)$$

式中: WR_{ij} 为第 i 分区 j 部门的需水量, m^3/s ; Q_{ij} 为相应河段的输水能力, m^3/s 。

河道内生态需水约束见下式。

$$Q_t \geq W_{Rt} \quad (10)$$

式中: Q_t 表示 t 时段内河道流量, m^3/s ; W_{Rt} 表示 t 时段内河道生态需水量, m^3/s 。

其他约束包括非负约束、子区水量平衡、部门水量平衡、时段可利用水量约束、劳动力约束、资金约束等。

3 结论与讨论

3.1 讨论

以往很多研究将水足迹作为评价指标来衡量不同区域生产同一产品的用水效率,这种比较既有不同区域间的,也有同一区域不同年份的。这种比较的目的是识别水足迹最大和最小的热点区域,通常来说,生产同一产品,水足迹较大的地方用水效率低,应该减少生产;水足迹较小的地方用水效率较高,应该增加生产。但是,这种对水资源利用效率后评价式的应用尚不能在区域水资源配置阶段发挥充分作用,因此目前水足迹是作为一种评价用水效率的工具,而不是水资源配置阶段制定分配策略的前提。本研究目的是将水足迹纳入水资源配置的理论框架和模型中。由于水足迹反映了生产某一产品各环节所消耗水的总和,因此某一区域各产品及供水工程的水足迹总和反映了该区域维持社会生产从水的自然循环中提取的总得水量,该总水量应该是越小越优型。与传统配置水资源的用水量指标相比,将水足迹作为控制指标更可能从全局角度进行生产方案和水资源配置的优化。

在进行某一区域的水足迹控制时,依据本研究方法计算的水通量可能偏大。原因是当选定某一区域进行某种产品生产时,该产品的水足迹没有扣除该区域自身存在的水足迹(本底蒸发),事实上某一区域在没有从事加工与生产的自然状况下也会存在自然水循环,产生水足迹,这部分水足迹应该扣除。本研究没有扣除本底蒸发,但由于水足迹控制目标是最小化函数,因此本底蒸发作为一个常量,并不会影响水足迹控制结果。

此外,由于本研究应用了水足迹的加和,本研究所用水足迹的单位并不是常用的,而是其反映生产某一产品的水通量。

3.2 结论

目前水足迹是作为水资源利用效率的评价指标,而不是水资源配置的技术工具。为了将水足迹控制纳入水资源配置模型,本研究分析了区域水足迹的主要成分,即区域生产水足迹和区域水利工程的水足迹。其中,区域水利工程的水足迹由建设期水足迹和运行期水足迹构成。本研究选定区域水足迹最小作为水资源配置的目标条件,在社会生产、水库库容上限和下限、输水能力、河道生态需水等约束条件下进行优化求解。

该优化模型能反映区域内人类生产活动对自然水循环的扰动程度,在进行区域水利工程的布置和方案选择时能为各方案节水目标提供有效参考。传统水资源配置模型以水量作为约束,经济社会生态效益最大为目标条件;而本模型以社会生产等为条件,以水足迹最小作为目标条件,更充分地强调了水资源价值,为水资源配置提供了新途径和思路。

由于水利工程规模庞大,对水足迹进行精确计算也十分困难。本研究提供的方法只是初步尝试,但是工程水足迹的概念对于在水足迹框架下进行工程方案比选是基础,因此其

计算是非常重要的。此外,对于本底蒸发问题,也是今后进一步完善水足迹模型时须要考虑的。

将水足迹最小作为工程方案优选的控制目标,理论上能够充分节水。但是社会生产安排仍然要考虑土地、劳动力、资金等其他生产要素,因此配置结果仍要与以往的水资源配置模型相互参照,才能更好地在社会经济、生态环境与水资源之间构建良好、可持续的关系。

参考文献:

- [1] Allan J A. 'Virtual water': a long term solution for water short Middle Eastern economies? [D]. School of Oriental and African Studies, University of London, 1997.
- [2] 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 UNESCO - IHE, Delft, the Netherlands, 2002.
- [3] 王红瑞, 王 岩, 吴峙山, 等. 北京市用水结构现状分析与对策研究[J]. 环境科学, 1995, 16(2): 31 - 34, 72.
- [4] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2007, 21(1): 35 - 48.
- [5] 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 - 3237.
- [6] Williams L E. Effect of applied water amounts at various fractions of evapotranspiration on productivity and water footprint of Chardonnay grapevines [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2014, 65(2): 215 - 221.
- [7] Cao X C, Wu P T, Wang Y B, et al. Water footprint of grain product in irrigated farmland of China [J]. Water Resources Management, 2014, 28(8): 2213 - 2227.
- [8] Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: a case study for the Yellow River basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(6): 2219 - 2234.
- [9] Pfister S, Bayer P. Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 73(12): 52 - 62.
- [10] Xu Y J, Huang K, Yu Y J, et al. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: a logarithmic mean Divisia index decomposition analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87(1): 180 - 187.
- [11] Sivapalan M, Savenije H H G, Blöschl G. Socio - hydrology: A new science of people and water [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1270 - 1276.
- [12] Wei Y H, Tang D S, Ding Y, et al. Incorporating water consumption into crop water footprint: A case study of China's South - North Water Diversion Project [J]. Science of The Total Environment, 2016, 545: 601 - 608.
- [13] Gerbens - Leenes P W, Hoekstra A Y, Meer T V D. 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.