

文章编号 1000-5013(2004)03-0331-03

# 虚拟水分析理论和方法

牛 树 海

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100012)

**摘要** 水资源分布的区域差异加剧了水资源的紧张局面. Tony Allan 提出虚拟水的新概念和计算方法, 已成为缓解区域水紧张状况的一个有效方法. 文中系统地介绍虚拟水方法和战略, 以及其理论框架、指标体系和计算方法. 介绍全球主要国家和地区的虚拟水交易量, 阐述了虚拟水方法的应用.

**关键词** 虚拟水, 水足迹, 虚拟水贸易

**中图分类号** TV 211.1 F 062.1

**文献标识码** A

我国水资源绝对量大, 相对量小, 水资源安全形势十分严峻. 水资源严重短缺及水资源的日益枯竭, 严重制约区域社会经济发展和导致区域生态环境恶化. 水资源短缺已成为制约我国经济社会可持续发展的瓶颈之一.

## 1 虚拟水的基本概念

自从都柏林会议 10 年来, 把水资源视作经济商品的观点已频繁出现在各种会议文件中. 如果水资源真的能够作为商品来看待的话, 那么也许可以解决由于过度开采和水质污染所带来的水匮乏问题. 因此, 寻求合适的方法和手段来处理水问题, 已成为研究者和决策者迫切需要解决的课题.

虚拟水是 20 世纪 90 年代由国外提出的新概念, 系指生产商品和服务所需要的水资源. 虚拟水也被称为“嵌入水”和“外生水”<sup>[1]</sup>. 顾名思义, 虚拟水不是真实意义上的水, 而是以虚拟的形式包含在产品中的“看不见”的水, 是以虚拟的形式体现出来的<sup>[2]</sup>.

## 2 指标体系

### 2.1 水足迹

一个国家或地区的用水量不是它在全球水资源中所占的份额. 为了得到一个国家或地区对全球水资源的真正占用量, 必须加上或减去虚拟水的净进口或出口量. 这就是一个国家或地区的“水足迹”, 被用来作为测量该国或地区对全球水资源的实际占用量的一个概念. 用公式表示为

$$W_f = W_u + W_i,$$

式中  $W_f$  代表一个国家或地区的水足迹,  $W_u$  是指一个国家或地区内的总用水量,  $W_i$  代表一个国家或地区总的虚拟水净进口量, 其值可以为负. 值得注意的是,  $W_u$  既包括地表水的使用, 又包括降水的使用. 由于降水的使用数据难以取得, 因此主要是指地表水的使用.

### 2.2 水匮乏度

为了发现水匮乏程度与虚拟水净进口量的关系, 引进了水匮乏度和依赖度的概念. 水匮乏度是指一

收稿日期 2003-11-09

作者简介 牛树海(1976-), 男, 博士生, 主要从事区域可持续发展、交通基础设施的研究. E-mail: Niush @igsrr. ac. cn

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40131010); 中国科学院地理资源与研究所知识创新工程领域前沿项目(CX10GB02-02); 中国科学院知识创新工程(KZCX2-307)

个国家或地区总的用水量与可利用水的比率,其公式为

$$W_s = W_u \times 100 / W_a.$$

在这个等式中,  $W_s$  是指水匮乏度,  $W_a$  代表总可利用水资源量,它们的单位都是  $m^3$ . 因此,水匮乏度是一个在 0 与 100 之间的百分数.

2.3 水依赖度

水依赖度 ( $W_d$ ) 全称是虚拟水进口依赖度. 它是一个反映通过以虚拟的方式进口水资源水平的指标,因此有

$$W_d = W_i \times 100 / (W_u + W_i).$$

值得注意,这是水足迹  $W_u + W_i$  不小于 0 时的公式,当水足迹为负时,  $W_d$  为 0. 与水依赖度相对应的是水自给率 ( $W_{ss}$ ), 其公式为

$$W_{ss} = 1 - W_d.$$

3 虚拟水计量分析方法

3.1 虚拟水计算方法

各种物品都包含有虚拟水,如日常生活用品、纸、机器等. 在工业产品中,虚拟水的计算过程复杂,而且工业产品中的虚拟水含量相对农产品而言数量较少<sup>[2,3]</sup>. 因此,目前的研究主要集中在农作物的虚拟水含量. 要计算农作物的虚拟水含量,必须知道作物的需水量 ( $W_{cn}$ ). 作物需水是根据作物在生长发育期间的累积蒸发蒸腾水量 ( $ET_c$ ) 来计算的. 影响作物需水量的主要因素,包括气象因素降水、气温、水气压、日照、风速和作物类型土壤条件及种植时间等. 其数值公式为

$$ET_c = K_c \times ET_0. \tag{1}$$

$ET_0$  是参考作物蒸发蒸腾水量;  $K_c$  是作物系数,反映实际作物和参考作物表面植被覆盖,与空气动力学阻力以及生理与物理特征的差异. 在计算  $ET_0$  时,忽略了作物类型、作物发育、管理措施等对作物需水的影响. 根据粮农组织 (FAO) 推荐并修正的标准彭曼公式,可计算为

$$ET_0 = \frac{0.408 (R_n - G) + \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{+ (1 - 0.3 U_2)}. \tag{2}$$

在式 (2) 中,  $R_n$  为作物表面的净辐射量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ ),  $G$  为土壤热流量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ ),  $T$  为平均气温 ( $^{\circ}C$ ),  $U_2$  为离地面两米高处风速 ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $e_a$  为饱和状态下的蒸气压力 (kPa),  $e_d$  为实际蒸气压力 (kPa),  $e_a - e_d$  为蒸气压力差异 (kPa),  $\gamma$  为蒸气压力曲线斜率 ( $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ),  $\gamma_0$  为干湿度常量 ( $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ). 在得到作物的需水量后,就可以计算单位作物所含的虚拟水量. 其计算公式为

$$D_{n,c} = R_{n,c} / Y_{n,c}. \tag{3}$$

式 (3) 中  $D_{n,c}$  表示  $n$  区域单元  $c$  作物的虚拟水含量 ( $m^3 \cdot t^{-1}$ ),  $R_{n,c}$  为该区域  $c$  作物的需水量 ( $m^3 \cdot hm^{-2}$ ),  $Y_{n,c}$  指该区域  $c$  作物的产量 ( $t \cdot hm^{-2}$ ).

3.2 虚拟水贸易分析

(1) 主要作物产量及虚拟水含量. 根据上述计算方法,对我国 1999 年主要农作物虚拟水含量进行计算 (表 1). 由于气候条件及需水性的差异,各种农作物的虚拟水含量差别很大,作物本身含水量大的

表 1 主要作物产量及虚拟水含量

作物品种	香蕉	大麦	干豆	绿豆	葡萄	花生	玉米	芒果	小米
需水/ $m^3 \cdot hm^{-2}$	5 180	4 100	4 330	4 120	5 200	4 960	3 500	10 760	2 930
产量/ $t \cdot hm^{-2}$	2.8	2.5	1.4	11.2	12.4	3.0	4.9	12.5	1.7
虚拟水/ $m^3 \cdot t^{-1}$	1 850.0	1 640.0	3 092.9	367.9	419.4	1 653.3	714.3	860.8	1 723.5
作物品种	柑桔	稻	甘薯	棉籽	菠菜	小麦	胡椒粉	瓜类	棕榈
需水/ $m^3 \cdot hm^{-2}$	7 360	6 800	4 960	6 780	3 900	4 040	4 070	4 990	9 980
产量/ $t \cdot hm^{-1}$	12.4	6.3	20.3	3.8	14.0	3.9	1.5	26.3	14.7
虚拟水/ $m^3 \cdot t^{-1}$	593.5	1 071.9	244.3	1 784.2	278.6	1 035.9	2 713.3	189.7	678.9

虚拟水含量并不一定大. 因此, 虚拟水含量与农作物产品本身含水量关系不大. 这是虚拟水计算意义之所在. (2) 全球各地区虚拟水进、出口量. 得到农作物虚拟水含量  $D_{e,c}$  后, 再给出农作物贸易量  $CT_{e,i,c,t}$ . 两者的乘积即为虚拟水贸易量  $VWT_{e,i,c,t}$ , 单位为  $m^3$ . 有

$$VWT_{e,i,c,t} = CT_{e,i,c,t} \times D_{e,c},$$

式中  $VWT_{e,i,c,t}$  代表由虚拟水出口国  $e$  向进口国  $i$  每年出口  $c$  作物所含虚拟水总量. 图 1 是 1995 ~ 1999 年各主要地区虚拟水进、出口量. 由图 1 可以清楚地看出, 净进口虚拟水地区主要集中在用水量大和缺水的中亚、南亚、西欧、北非和中东地区. 这些地区通过进口虚拟水, 极大地缓解了地区缺水局面, 使地区水资源紧张的局势得到了暂时的控制. 净出口量最大的地区集中在水资源相对比较丰富的北美、南美和大洋洲地区. 由全球虚拟水的地区间流动可以看出, 虚拟水战略已经成为国际间水贸易的主要方式.

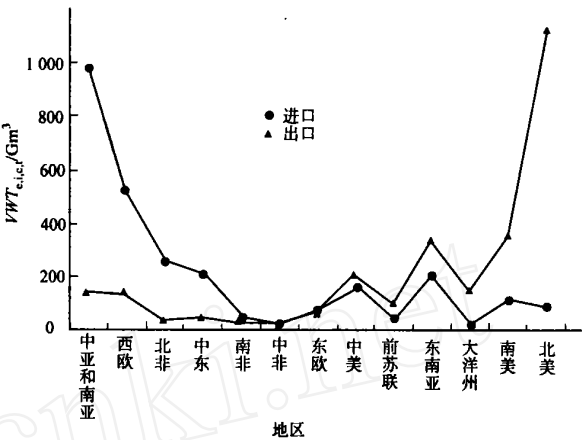


图 1 1995 ~ 1999 年国际主要地区的虚拟水进出口量示意

4 结束语

(1) 虚拟水战略. 通过引进虚拟水概念, 实现了对贸易过程中水资源的描述, 以及国际上各地区水资源交易过程中的可计算性和可比性. 这使得虚拟水方法具有广泛的应用范围. 它既可以计算个人、家庭、城市、区域、国家乃至整个世界在日常生活中的所消费的水资源, 对其进行纵向的、横向的比较分析, 又可以就不同国家和地区虚拟水贸易进行计算. 从而, 使区域间水资源得到转移, 能够暂时消除地区间水资源紧张的局面. 虚拟水已经成为国际水资源研究的一个重要方面.

(2) 虚拟水在理论和方法上, 需要进一步商榷和完善.

参 考 文 献

1 Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[A]. In: Allan J A, eds. Priorities for Water Resources Allocation and Management[C]. London: Overseas Development Administration, 1993. 13 ~ 26  
2 Hoekstra A Y. Virtual water trade: an introduction[A]. In: Hoekstra A Y, eds. Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series[C]. Delft: International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, 2003. 13 ~ 23  
3 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 861 ~ 869

Theory and Method of Virtual Water Analysis

Niu Shuhai

(Inst. of Geograph. Sci. & Natural Resources, CAS. 100012, Beijing, China)

**Abstract** On account of general applicability of the innovative thinking and method, the new concept of virtual water and its calculating method advancing by Tony Allan have become more and more popular as an effective method for alleviating regional water shortage. The author gives here a systematic account of theoretical framework, indicator system and calculating method of virtual water method and strategy; and sets forth specifically the applications of virtual water method through trading limit of virtual water in main countries and regions of the whole world.

**Keywords** virtual water, water imprint, virtual water trading