

文章编号: 1007-7588(2005)03-0123-07

甘肃省 2000 年水资源足迹的初步估算

龙爱华¹, 徐中民¹, 张志强², 苏志勇³

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院资源环境科学信息中心, 兰州 730000;

3. 兰州大学干旱农业生态重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 水资源足迹是真实反映人类对水资源消费利用的新概念, 能深刻揭示社会经济系统对水资源的真实消费, 水资源足迹核算为水资源科学管理提供了一个新视角。文章提出了水资源足迹的概念和计算方法, 以甘肃省为例, 运用产品虚拟水研究方法核算并分析了 2000 年的虚拟水消费和水资源足迹。结果表明, 2000 年甘肃省全社会的水资源足迹为 $221.231 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水足迹为 $865.24 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{年}$ 和 $2.371 \text{ L}/\text{人} \cdot \text{天}$, 大大高于统计的水资源利用量; 虚拟水计算基础上的水资源足迹衡量不仅深刻刻画了人类对水资源的真实占用情况, 同时对我国干旱区水资源管理具有重要的战略启示: 提高水资源利用效率、改善人类消费结构及消费模式和虚拟水进口。

关键词: 水资源足迹; 虚拟水; 虚拟水消费; 甘肃省

人类的生存依赖于自然, 人类社会必须生存于生态系统的承载力范围内。可持续发展是一种全新的发展战略和发展观, 但要在这种发展理念变成可操作的发展模式, 就必须定量测度发展的可持续性状态。为了将可持续性转化为具体的指标来测量人类是否生存于生态系统承载力的范围内, 生态足迹方法进行了简单而综合的尝试^[1,2]。徐中民、张志强等在国内最早开展了生态足迹指标的实证应用研究。生态足迹指标将各种资源和能源消费项目折算为 6 种生物生产面积类型, 将它们转化为具有相同生态生产力的生物生产面积^[3]。生态足迹分析没有描述完全自然系统提供资源、消纳废物的功能, 忽略了地下资源和水资源的估算, 也没有考虑污染的生态影响。事实上, 由于酸雨、工业废水等引发的资源状况恶化, 世界上的生态生产性土地及水域面积在不断缩减。因此, 我们现在实际占用的生态足迹要比计算结果更大。

水资源短缺已经成为许多国家和地区社会经济可持续发展的瓶颈, 因此核算水资源足迹对真实地衡量人类对水资源消费利用情况就十分必要。尤其

是对干旱地区, 核算水资源足迹也可为水资源的可持续管理提供丰富的科学信息。本文介绍了水资源足迹概念和计算方法, 并以甘肃省为例计算分析了 2000 年的水资源足迹, 讨论了水资源足迹对我国西北地区水资源管理的战略意义。

1 水资源足迹的概念及计算方法

1.1 水资源足迹与虚拟水

人类对水资源系统的影响是通过消费水资源提供的产品和服务产生作用的, 如何真实地刻画这种作用大小和影响程度, 可以从人类对水资源和水资源所提供的产品和服务的消费入手。类似于生态足迹的概念^[1], 水资源足迹可以定义为: 任何已知人口(某个人、一个城市、一个区域或全球)的水资源足迹是生产这些人口所消费的所有资源所需要的水资源数量。这里的所有资源, 既包括人类生活所必需的食物、各种日用品、生活直接消费的水资源, 同时也包括为人类提供生态系统服务和功能的生态环境资源。因此, 水资源足迹可以真实地反映一个人、一个地区或一个国家对水资源的真实需求和真实占用情况, 衡量水资源足迹能反映人类对水资源系统水资

收稿日期: 2004-07-09; 修订日期: 2004-12-06

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(编号: 40235053); 国家自然科学基金(编号: 40201019)。

作者简介: 龙爱华(1976-), 男, 湖南安仁人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态经济与水资源管理研究。

E-mail: ahlorg@rs.lzb.ac.cn

1) Wackernagel, M., Onisto, L., Linares A.C., et al. Ecological footprints of nations: How much nature do they use? -How much nature do they have? Center for Sustainability Studies, Universidad Anahuac de Xalapa, Mexico, 1997.

源量的压力大小,为科学利用有限的水资源提供有益的决策依据;在或增加不降低人类福利的同时,充分调动各种社会资源,改善人类的水资源利用模式,实现水资源的可持续利用。

人类对水资源的消费通常主要是通过消费由水资源提供的各种产品和服务等间接方式进行的。产品和服务生产过程中所需要的水资源就称为产品所包含的虚拟水^{[1][4]}。如生产 1kg 粮食大约需要 1t ~ 2t 水资源,生产 1kg 奶酪和牛肉的水资源分别需要大约 5t ~ 5.5t、16t 的水资源^[2]。虚拟水以“看不见”的形式蕴涵在各种产品当中,因此产品消费实质上是间接地消费水资源。由于人类生活直接利用的实体水资源数量一般很少^[3](如人类每天为满足机体需求通常需要 2L ~ 4L 的水资源,但为满足食品消费的虚拟水数量通常大约是机体需求的 1 000 倍),产品形式的虚拟水消费是人类消费水资源的主要形式,因此人类消费的虚拟水就成为水资源足迹的主要组成部分。

1.2 水资源足迹的衡量

各种产品中实际蕴涵了大量的水资源,产品流通和市场贸易使一个地区的居民可以消费到许许多多其他区域生产的各种产品,从而间接消费“异地”水资源。可见由于产品贸易的影响,一个国家或地区的实体水资源利用并不能真实地代表它对水资源的消费占用情况,衡量一个国家或地区的水资源的真实消费时,进口的虚拟水应该加到该国家或地区的水资源消费上,而出口的虚拟水应该从国家或地区的水资源消费中扣减。在干旱地区,生态环境是经济发展的前和保证,从一定程度上来说,生态环境用水是应该得到保证的,应放到和人类消费用水同样的战略高度进行处理,因此生态环境用水应该作为人类水资源消费的一个有机组成部分。一个国家或地区的水资源足迹可以表示为:

$$WF = PVW_{\text{expenditure}} + RW_{\text{expenditure}} + ENV_{\text{expenditure}} + NVWI \quad (1)$$

式中: WF 是一个国家或地区水资源的足迹; $PVW_{\text{expenditure}}$ 是本地产品消费的虚拟水含量; $RW_{\text{expenditure}}$ 是生活利用的实体水消费; $NVWI$ 是净进口虚拟水消费量, $ENV_{\text{expenditure}}$ 是生态用水。

前面的分析表明,衡量一个国家或地区的水资源足迹主要需要量化虚拟水消费量。一般情况下,由于产品消费的实物量数据比较容易获取,因此单位产品的虚拟水含量计算就成为水资源足迹衡量的

关键。

2 水资源足迹中虚拟水消费的计算方法

水资源足迹的计算同生态足迹的研究一样^[1~3],是尝试采用账户的方式解释水资源在社会经济系统中的迁移转换。食品作为人类的生活必需品携带有大量的虚拟水,是当前世界贸易中数量最大的商品。从当前的研究来看,由于工业产品虚拟水含量计算过于复杂并且实际消耗的水资源数量一般较小通常采用估计方法近似或忽略不计,农作物产品的虚拟水和动物产品的虚拟水计算是目前虚拟水计算中的最主要部分。

2.1 农作物产品虚拟水含量的计算

目前计算农作物产品虚拟水含量的方法主要有两种,一种是 Chapagain 等提出的研究不同产品生产树的方法^[3],另一种是 Zimmer 等基于对不同产品类型区分的计算方法^[4]。农作物产品生产需要的水资源主要取决于农作物的类型、生长区域的自然地理条件、灌溉条件和管理方式等。单一农作物产品虚拟水含量可以根据公式(2)计算:

$$V_{cn} = \frac{W_{cn}}{Y_{cn}} \quad (2)$$

式中: V_{cn} 为区域 n 作物 c 单位重量的虚拟水含量 (m^3/t); W_{cn} 为区域 n 作物 c 的实际耗水 (m^3/hm^2); Y_{cn} 为区域 n 作物 c 的产量 (t/hm^2)。

作物需水指作物在生长发育期间蒸发蒸腾所消

1) Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydropolitical futures would be impossible. In: ODA. Priorities for water resources allocation and management. ODA, London, 1993.

2) Hoekstra A Y. Virtual water trade: an introduction. In: Hoekstra A Y edited. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No12. IHE DELFT. February 2003.

3) Chapagain, A. K. and A. Y. Hoekstra. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products. In: Hoekstra A Y edited. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No12. IHE DELFT. February 2003.

4) Zimmer D. Renault D. Virtual water in food production and global trade: review of methodological issues and preliminary results. In: Hoekstra A Y edited. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No12. IHE DELFT. February 2003.

耗的水资源量, 通常采用联合国粮农组织推荐的标准彭曼公式进行计算。农作物蒸发蒸腾所消耗的水量采用参考作物的需水 ET_0 乘以作物系数 K_c 进行计算:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中: ET_0 为参考作物的需水, 一般采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的标准彭曼公式计算 ET_0 , 限于篇幅, 公式 (4) 中各参数的含义参见有关文献¹⁾:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

2.2 动物产品虚拟水含量

动物产品的虚拟水含量主要依赖于动物类型、饲养结构和动物成长的自然环境条件, 计算比较复杂。其计算首先需要确定活动物对水资源的消耗, 然后再在不同的动物产品之间进行分配。活动物虚拟水含量指动物从生命开始到其生命结束的时期内, 动物生存生长所消耗的总水量, 包括饲料所含的虚拟水、饮用水、动物饲舍清洁等耗水。饲料消费中的虚拟水包括饲料作物中所含的虚拟水和混合饲料作物所需的实体水。饲料作物虚拟水含量按照不同饲料作物的构成比例 (重量) 进行加权计算, 饲料作物的虚拟水含量采用前面介绍的标准彭曼公式计算。

不同动物产品的虚拟水含量计算需要将活动物的虚拟水含量在动物产品间进行分配。直接由活动物提供的产品称为第一类动物产品, 如动物畜体、内脏、皮毛等, 其虚拟水含量包括活动物虚拟水和为得到不同第一类初级产品加工所需要的水资源量。为在不同的第一类产品间分配活动物的虚拟水含量和加工需水, 引进产品比例因子和价值比例因子。产品比例因子定义为从活动物得到的不同第一类动物产品的数量比例。如一头 500kg 的牛宰杀后得到 300kg 的畜体, 则畜体的生产比例因子为 0.6。价值比例因子第一类产品的市场价值与所有第一类产品市场价值总和的比例。

2.3 虚拟水贸易流和虚拟水贸易平衡

国家或地区间的虚拟水贸易量采用贸易的商品量乘单位商品的虚拟水含量来确定 (公式 5)。虚拟水含量主要取决于虚拟水出口方产品单位产量的水需求, 单位产品的虚拟水含量采用生产者方法确定。

$$VWT[n_e, n_i, c, t] = CT[n_e, n_i, c, t] \cdot SWD[n_e, c] \quad (5)$$

$VWT[n_e, n_i, c, t]$ 代表在时间 t , 商品出口方 n_e 与进口方 n_i 间贸易产品 c 的虚拟水量; $CT[n_e, n_i,$

$c, t]$ 在时间 t , 商品出口方 n_e 与进口方 n_i 间产品 c 的贸易量; $SWD[n_e, c]$ 是商品出口方 n_e 产品 c 单位质量的虚拟水含量。

对国家或地区 n_i 来说, 总的虚拟水进口 $GVWI[n_i, t]$ 是所有产品虚拟水进口的加总:

$$GVWI[n_i, t] = \sum_{n_e, c} VWT[n_e, n_i, c, t] \quad (6)$$

对国家或地区 n_e 来说, 总的产品虚拟水出口 $GWWE[n_e, t]$ 是所有产品虚拟水出口的加总:

$$GWWE[n_e, t] = \sum_{n_i, c} VWT[n_e, n_i, c, t] \quad (7)$$

一个国家或地区净虚拟水贸易量是总的虚拟水进口量减去虚拟水的出口量。某国家或地区 x 在时间 t 的虚拟水贸易平衡可用公式 (8) 表示。

$$NVT[x, t] = GVWI[x, t] - GWWE[x, t] \quad (8)$$

$NVT[x, t]$ 代表时间 t 国家或地区 x 净虚拟水进口。一个国家或地区净虚拟水进口的符号可正可负, 为负表示该国家或地区是虚拟水出口。

3 甘肃省 2000 年的水资源足迹

甘肃省地处我国西北干旱半干旱地区, 水资源缺乏, 生态环境十分脆弱, 2000 年全省水资源量 $188.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水资源和每公顷耕地水资源量分别为 1944 m^3 和 14475 m^3 , 低于水资源短缺最为严重的西北地区人均水资源占有量水平。1994 年 ~ 2000 年以来, 水资源紧缺程度日益加剧, 平均年缺水率达 7.36%, 其中 2000 年缺水 10.48%, 水资源总量矛盾十分突出²⁾, 已经成为甘肃省社会经济发展的主要限制因子之一。定量估算水资源足迹, 将有助于认清甘肃省对水资源多方位的利用情况, 有助于有效制定缓解水资源短缺的对策和措施, 实现水资源的持续利用管理。

3.1 计算内容和数据来源

根据甘肃省的实际情况及资料的可获得性, 主要从三方面对 2000 年甘肃省的水足迹进行衡量:

①居民主要商品虚拟水消费量; ②虚拟水贸易进出口量; ③生活实体水消费量; 最后初步计算了 2000 年甘肃省水资源足迹。计算数据来源包括:

① FAO 的 CLIMATE 数据库和 CROP 数据库 (<http://www.fao.org>); ②国际虚拟水研究的中国动物产品

1) Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO irrigation and drainage paper 56. 1998.

2) 甘肃省水资源公报, 甘肃省水利厅, 2001.

虚拟水含量计算成果¹⁾; ③统计资料和相关文献, 如《甘肃年鉴 2001》⁶⁾和《2000年甘肃省水资源公报》等。

3.2 2000年甘肃省单位作物产品虚拟水计算

首先采用联合国粮农组织推荐的标准彭曼公式计算了敦煌、酒泉、盐池、民勤、兰州、平凉、天水等7个地区11种主要作物需水, 分别经面积加权调整, 得到不同初级作物产品生产的平均需水。考虑单位面积作物产量和最终产品加工转化率后, 分别得到不同最终产品的虚拟水含量。计算表明, 2000年甘肃省生产1kg净粮食, 需要耗费至少2630kg的水量; 生产1kg植物油耗费的水量高达6194kg; 生产1kg蔬菜的水量教少, 但也需要135kg的水量。因此, 每消费1kg的粮食、植物油和蔬菜, 实际上相当于消费了2630kg、6194kg和135kg的水资源。

3.3 居民主要消费品虚拟水消费

根据单位农产品虚拟水含量计算结果和相关统计数据, 计算了2000年甘肃省城乡居民主要产品虚拟水消费量(表1)。由于动物产品虚拟水的计算需要的数据较多并且不容易获得, 单位动物产品虚拟水含量采用 Chapagain 和 Hoekstra 根据世界各国动

物和动物产品贸易数据, 计算世界各国动物产品的虚拟水含量研究中中国部分的数据成果¹⁾。从表1可以看出, 除粮食以外, 农村居民人均产品消费量均低于城镇居民, 但虚拟水消费量明显高于城镇居民。从计算情况看, 主要是由于粮食消费量差异引起的, 因此改善农村居民的消费结构, 可以较好地降低水资源足迹, 减轻人类对水资源系统的压力。

3.4 其他工业品消费虚拟水

工业品消费中的虚拟水量计算十分复杂; 首先, 工业品生产工艺复杂导致虚拟水核算复杂; 其次, 工业品不同于农产品, 属于耐用(可折旧)产品。因此, 在本文中工业品虚拟水消费的核算采用估计方法。2001年荷兰国际水力和环境工程研究所(IHE)以产品生产地为基础, 估计1995年~1999年全球国家间的虚拟水贸易67%体现在农作物产品的贸易中, 23%体现在动物和动物产品的贸易中, 10%体现在工业产品的贸易中; 另外日本研究组研究了日本的虚拟水消费情况: 1995年~1999年日本居民消费的农产品虚拟水量为1300m³/人·年, 而工业品虚拟水消费量为120m³/人·年, 不到农产品虚拟水消耗的10%¹⁾。从甘肃省工农业的实际用水看, 2000年工

表1 甘肃省2000年城乡居民主要消费品虚拟水消费量

Table 1 Content of virtual water consumption of main commodities of city and county residents in Gansu Province in 2000

产品消费项目	单位质量产品虚拟水含量 (m ³ /kg)	消费数量 ¹⁾ (kg/人·年)		各产品消费虚拟水含量 (m ³ /人·年)		各项消费总虚拟水量 (×10 ⁸ m ³) ⁴⁾		总计 (×10 ⁸ m ³)
		城镇居民	农村居民	城镇居民	农村居民	城镇居民	农村居民	
粮食	2.630(1.840) ¹⁾	78.520	256.530	206.540	472.350	12.700	91.970	104.670
食用植物油	6.194	8.300	5.950	51.410	36.850	3.160	7.180	10.340
鲜菜	0.135	93.840	44.620	12.710	6.040	0.780	1.180	1.960
猪肉	3.561	12.820	8.140	45.650	28.990	2.810	5.640	8.450
牛肉	19.989	1.230	0.780	24.590	15.610	1.510	3.040	4.550
羊肉	18.005	1.700	1.080	30.610	19.430	1.880	3.780	5.670
家禽	3.111	3.140	0.730	9.770	2.270	0.600	0.440	1.040
鲜蛋	8.651	9.630	1.880	83.310	16.260	5.120	3.170	8.290
鱼虾	5.000	2.720	0.120	13.600	0.600	0.840	0.120	0.950
食糖	1.805	1.250	0.760	2.260	1.370	0.140	0.270	0.410
卷烟(盒) ²⁾	5.052	38.940	30.680	19.670	15.500	1.210	3.020	4.230
白酒	3.288	2.230	1.070	7.330	3.520	0.450	0.910	1.360
啤酒	0.231	2.180	0.500	0.160	0.030	0.030	0.060	0.500
饮料	0.005	0.820	0.010	0.010	0.010	0.001	0.0010	0.010
鲜瓜	1.376	66.800	38.060	91.950	52.390	5.650	10.200	15.850
鲜奶	2.201	16.360	10.340	36.010	22.760	2.210	4.430	6.650
糕点	4.157	2.190	0.440	9.100	1.830	0.560	0.360	0.920
棉布(m) ³⁾	9.776	0.260	0.170	5.080	3.320	0.310	0.650	0.960
总共				650.100	718.140	39.910	139.533	179.443

注: ①括号中为单位原粮虚拟水含量, 括号外为单位净粮食虚拟水含量, 单位原粮产出净粮食为0.7, 不同作物换算成粮食的方法依据我国统计部门的折算方法; ②这里假设每包卷烟折算成烟叶0.1kg; ③每米棉布折算成棉花纤维2kg; ④2000年甘肃省城镇居民为613.91×10⁴人, 农村居民为1942.98×10⁴人。

1) Chapagain, A. K. and A. Y. Hoekstra. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products. In: Hoekstra A Y edited. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No12. IHE DELFT. February 2003.

业用水仅占农业用水的 1/6 强。考虑到工业用品一般为耐用品这一特点, 本文中我们取当年城镇居民农产品虚拟水消费量的 6% 作为城市居民工业品使用所消费的虚拟水量, 当年农村居民农产品虚拟水消费量的 3.5% 作为农村居民工业品使用所消费的虚拟水量。

3.5 净进口虚拟水和生活实体水消费

净进口虚拟水包括农产品净进口和工业产品净进口两部分。水资源足迹中出口产品虚拟水应该从一个国家或地区的水资源消费中扣减, 而进口产品虚拟水应该加到水资源消费中。

从统计情况看, 2000 年甘肃省农产品进口数量极少, 进口商品中的绝大部分为矿石、化工原料和机械仪表等, 由于这些产品生产需水数量较小、计算难度很大, 实际计算过程中可以忽略。计算表明, 2000 年甘肃省出口的虚拟水量为 $0.273 \times 10^8 \text{ m}^3$, 数额较小, 符合甘肃省水资源紧缺、农业系统生产能力不高的现状。生活实体水消费包括实际生活用水和服务业用水。生活用水包括城镇居民生活用水和农村居民生活用水; 服务业用水主要是第三产业用水和城镇公共用水。

3.6 2000 年甘肃省水足迹计算结果分析

依据公式(1)~公式(8), 初步计算了甘肃省 2000 年的水资源足迹(表 2)。由于全省范围的生态环境用水准确计算难度较大, 本计算中生态用水参考了有关研究的计算结果。同时, 除河西走廊外, 由于甘肃省其他地区的生态耗水研究案例少, 计算难度大, 本次计算暂时没有考虑, 而仅考虑了河西走廊的生态用水。王芳等^[8]运用遥感和 GIS 技术计算了西北地区生态耗水情况。其中, 河西走廊为 $28.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 本文采用该结果。表 2 表明, 2000 年甘肃省总的水足迹为 $221.231 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水足迹为 $865.24 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{年}$ 和 $2371 \text{ L}/\text{人} \cdot \text{天}$ 。与虚拟水消费差异类似, 农村居民的水足迹仍然高于城镇居民, 但相比虚拟水消费的差异(农村居民比城镇居民人均多消费 $68 \text{ m}^3/\text{年}$), 则城乡平均水足迹差别迅速较小, 主要原因在于城市居民人均消费的实体水资源大大多于农村居民。在总的水足迹中, 实体水资源消费 $6.51 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅占全部水足迹的 2.94%; 居民消费的产品虚拟水量为 $86.72 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总足迹的 84.40%。从总的水足迹看, 2000 年甘肃省水足迹是其当年水资源利用总量 $122.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 1.803 倍和农业用水 $95.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 2.319 倍, 大大高于统

计利用量。其主要原因是: ①由于统计难易问题, 一般统计的实际水资源利用量通常仅包括地表水和地下水的消费部分, 而不包括直接被作物利用(不产生径流)的部分降雨、土壤水和空气凝结水, 而这部分水量对干旱区的农作物生产具有极其重要的作用。事实上, 在甘肃省东部、北部和南部部分区域的庆阳、平凉、陇南、定西等旱地粮食生产地区, 作物生产主要依靠天然降水和土壤水。这些地区 2000 年粮食生产面积占全省的 74.14%, 但农业用水仅占全部农业用水的(统计部分)13.39%^[1]; 同时, 对天然放牧的畜牧业生产来说, 动物消费的牧草耗水并没有包括在水资源利用的统计量中; ②动物产品具有储水作用。对一年生以上的动物, 动物活体和动物产品实际包括了多年的水资源消耗的累积; ③受畜、禽等饲养方式的影响。我国有很大一部分的猪肉、家禽生产是用作物和家庭生活的残余物喂养的, 因此这部分动物的虚拟水含量可能与农作物和家庭消费的虚拟水量进行了重复计算, 但从计算结果看, 这部分动物产品仅占总消费的份额很小; 如果再考虑部分饲料喂养方式, 则这部分虚拟水对整个消费量的影响不大。

表 2 2000 年甘肃省虚拟水消费和总的水足迹
Table 2 Total water footprint account and virtual water consumption of Gansu Province in 2000

	城镇居民	农村居民	全社会
主要食品虚拟水消费量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	39.910	139.533	179.443
其他工业品虚拟水消费($\times 10^8 \text{ m}^3$)	2.395	4.883	7.278
生活实体水消费量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	3.430	3.080	6.510
净进口虚拟水量($\times 10^8 \text{ m}^3$)	—	—	-0.274
生态环境用水($\times 10^8 \text{ m}^3$)	—	—	28.000
总的水足迹($\times 10^8 \text{ m}^3$) [*]	45.735	147.497	221.231
人均水足迹($\text{m}^3/\text{人} \cdot \text{年}$)	744.970	759.130	865.240
人均水足迹($\text{L}/\text{人} \cdot \text{天}$)	2041	2080	2371

水资源足迹计算的影响因素很多, 目前的水资源足迹计算还只是一种粗略估计。本研究的水资源足迹计算仅仅考虑了统计资料中所提供的主要产品消费项目, 同时暂时没有考虑甘肃省除河西走廊以外其他地区生态环境的水资源消费, 因此上面的计算结果仍然是一种保守估计。需要指出的是, 尽管如此, 本文的估算结果仍然大大高于 Hoekstra 和 Hung 有关水资源足迹研究中对中国的估算值:

1) 甘肃省水资源公报, 甘肃省水利厅, 2001.

419m³/人·年¹⁾。水资源足迹衡量定量地揭示了人类对水资源的真实消费状况,通常它们数量巨大却难以被人们认识,更重要的是,水资源足迹中的大部分—虚拟水—是可以流通的,这显然为水资源管理决策者的应对措施选择增加了新的内容。在不降低人均水资源消费需求情况下,通过虚拟水贸易可以很好地缓解水资源紧缺地区的水资源压力;另一方面,提高水资源利用效率、改变消费结构和消费模式可以有效降低人均水资源足迹,充分认识到这一点能促进人们更有效地消费水资源,降低人类对水资源系统的压力。因此对水资源紧缺的干旱地区来说,降低水资源系统的压力、实现水资源可持续利用一方面需要提高当地水资源利用效率,同时还要充分调动社会资源,通过虚拟水贸易间接“增加”水资源供给。

4 结论与讨论

水资源科学管理是干旱区水资源合理利用的中心问题。水资源可持续管理利用必须理解人类自己对水资源的真实占用情况,水资源足迹是真实反映人类对水资源消费利用的新概念。由于产品流通和商品贸易的作用,虚拟水概念为衡量地区水资源消费利用提供了一个新思路,基于虚拟水消费的水足迹衡量为定量人类对水资源的实际占用提供了一个崭新的视角。甘肃省的估算结果表明,2000年甘肃省全社会的水足迹是实体水资源利用总量的1.803倍,大大高于统计利用量;人均水足迹为865.24m³/人·年和2371L/人·天,但这一结果仍然是一种保守估计。

水资源足迹衡量不仅深刻刻画了人类对水资源的真实占用情况,同时对干旱区水资源管理具有重要的战略启示。一方面,在不降低人类生活质量的情况下,降低区域人均水资源足迹、缓解区域水资源压力不仅需要提高当地水资源利用效率,还需要改善人类的生活方式和消费结构,同时在更大尺度范围内和战略层次上,需要创新水资源管理体制^[9]。作为产品生产的必需投入要素,各种产品(尤其是农产品)中蕴涵、“寄存”了大量的水资源,进口一定数

量的水资源密集型产品实质上是进口了大量的虚拟水资源(甚至土地资源、劳动力资源等)。对水资源短缺的地区来说,水密集型产品进口可以间接地满足区域水资源需求。在社会人口不断增长和经济规模不断扩大的流域或地区尺度上,干旱地区解决水资源短缺问题已经不能仅仅局限于本地实体水资源的利用,而需要从系统的角度出发,运用系统思考的方法找寻与问题相关的各种影响因素,从问题范围外寻求解决流域内部问题的应对策略^[10]。随着全球经济一体化和地区经济合作的加深,区域经济系统的开放性不断增加,产品贸易下的虚拟水进口替代—虚拟水战略将为满足水资源紧缺地区的水资源需求开辟新的“源”,同时也为干旱区“节流”提供新的思路,是创新传统的水资源管理体制、解决干旱区水资源安全、粮食安全的有效战略工具。

参考文献 (References):

- [1] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607~616. [XU Zhong-min, ZHANG Zhi-qiang, CHENG Guo-dong. The calculation & analysis of ecological footprints of Gansu province in 1998[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 607~616.]
- [2] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部12省市的生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 599~610. [ZHANG Zhi-qiang, XU Zhong-min, CHENG Guo-dong, et al. The calculation & analysis of ecological footprints of 12 provinces in Western China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 599~610.]
- [3] 徐中民, 张志强, 程国栋. 中国1999年生态足迹计算与发展能力分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 280~285. [XU Zhong-min, ZHANG Zhi-qiang, CHENG Guo-dong. Ecological footprint and development capacity of China in 1999[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 280~285.]
- [4] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions [A]. In: Rogers, P. Lydon, P. Water in the Arab World: Perspectives and Prognoses [C]. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1994. 65~100.
- [5] Gleick, P.H. The World's Water 2000~2001[M]. Washington, D. C. Island Press, 2000. 20~37.
- [6] 中国统计局编. 甘肃年鉴2001[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001. [National Statistical Bureau of China. Gansu Yearbook in 2001[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.]
- [7] 中国统计局. 甘肃年鉴2001[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001. [National Bureau of Statistics of China. Gansu Yearbook 2001[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.]
- [8] 王芳, 王浩, 陈敏建, 等. 中国西北地区生态需水研究(2)—基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 129~137. [WANG Fang, WANG Hao, CHEN Min-jian, et al. A study of ecological water

1) Hoekstra A Y and Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. In: Hoekstra A Y edited. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12. IHE DELFT, February 2003.

- requirement of northwest in China(part two): a application of remote sensing and GIS [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002 17(2): 129 ~ 137.]
- [9] 程国栋. 虚拟水—中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003(4): 260 ~ 265. [CHENG Guo-dong. Virtual water—a strategic instrument to achieve water security [J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2003, (4): 260 ~ 265.]
- [10] 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. [XU Zhong-min, LONG Ai-hua, ZHANG Zhi-qiang. Virtual water consumption calculation and analysis of Gansu province in 2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003 58(6): 861 ~ 869.]

Primary Estimation of Water Footprint of Gansu Province in 2000

LONG Ai-hua¹, XU Zhong-min¹, ZHANG Zhi-qiang², SU Zhi-yong³

(1. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China;*

2. *Scientific Information Center for Resources and Environment, CAS, Lanzhou 730000, China;*

3. *Key Laboratory of Arid Agro-Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: Understanding the water resource cycle in a socio-economic system is an especially important problem in arid regions. Increasing shortage of water resources is an uncontroversial fact with population growth and economic development in Gansu province of China. How to alleviate the pressure of water resource is a major issue faced by decision-makers. In this paper, Gansu province is presented as a case study area to investigate the new concept of water footprint, its application and implication in social-economic system. Firstly, the concept of water footprint and its calculation methodologies are introduced in the paper. Water footprint is a new concept reflecting people's real consumption and usage of water resource in social-economic system, and is the cumulative virtual water content of goods and services consumed by a defined human population or economy. Therefore, quantification of the virtual water volumes of crop and livelihood are presented in details in the paper. Secondly, the paper quantified and analyzed the water footprint of Gansu Province in 2000. According to the assessment, citizens in Gansu province have consumed $189.0335 \times 10^8 \text{m}^3$ of water resource in total in 2000, which equivalent to $1\ 054.49 \text{m}^3/\text{yr}$ per capita and $2\ 889 \text{L}/\text{day}$ per capita. The actual consumption amount of water resource is approximately 2.2 times of the amount of statistical consumed volume.

We also simply discussed the advantage and disadvantage of the calculation method. The water footprint based on the virtual water not only reflects human beings' actual water appropriation, it is also of great importance for water management in arid zones of the northwestern China. The transferable water in social-economic system in a virtual form has been highlighted, which broadens the options of decision-makers. Based on our analysis, some suggestions have been put forward on how to alleviate the press of water shortage in arid regions.

Key words: Water footprint; Virtual water; Consumption of virtual water; Gansu province