

# 甘肃省水资源足迹与消费模式分析

龙爱华<sup>1</sup>, 张志强<sup>2</sup>, 徐中民<sup>1</sup>, 苏志勇<sup>3</sup>

(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, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院资源环境科学信息中心, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学干旱农业生态重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 阐述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 1989—2003 年的水资源足迹及其变化。结果表明, 1989 年以来甘肃省全社会的水资源足迹总量基本稳定在 220 亿~240 亿 m<sup>3</sup>/a, 总体上呈现微量的下降趋势, 人口增加和消费水平提高并没有增加对水资源系统在数量上的压力。从消费模式分析看, 随消费结构多样化的增加, 人均虚拟水消费量呈现不断下降的趋势, 因而, 增加消费结构的多样性有利于减少对水资源系统的压力。讨论分析了水资源足迹核算的意义, 指出了进一步研究需要注意的问题。

**关键词:** 水资源足迹; 虚拟水; 消费模式; 甘肃省

中图分类号: F416.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2005)03-0418-08

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, 相比其他资源如土地和能源的可持续性评价, 如生态足迹指标<sup>[1,2]</sup>, 目前有关水资源可持续利用的定量评价以及与人类消费模式之间关系的研究还很有限。水资源是产品生产的基础性资源之一, 因此人类的产品消费模式对水资源利用具有较大的影响和导向性。水资源短缺已成为我国干旱半干旱地区经济发展和社会进步的重要制约因素, 真实地衡量人类对水资源的消费利用情况, 可为水资源管理提供重要的管理信息, 对干旱区水资源利用决策具有重要意义。从消费需求角度研究人类对水资源的真实占用, 对分析、理解人类消费模式对水资源系统的压力、探索水资源可持续利用方式十分必要。本文运用水资源足迹概念并简单介绍其计算方法<sup>[3]</sup>, 基于产品虚拟水计算的衡量方法<sup>[4,5]</sup>, 分析 1989—2003 年甘肃省的水资源足迹变化, 并结合 1989 年以来的消费模式演变, 初步讨论消费结构与水资源足迹的关系及对我国西北地区水资源管理的理论意义。

## 1 水资源足迹的概念及计算方法

### 1.1 水资源足迹的概念、意义与虚拟水

人类通过消费水资源提供的产品和服务而对水资源系统产生作用及影响, 对这种作用的大小和影响程度的真实描述和计量, 可从分析人类对水资源本身和水资源所提供的产品和服务的消费入手。如, 生产 1 kg 粮食大约需要 1~2 t 水资源, 生产 1 kg 奶酪和牛肉分别需要 5~5.5 t、16 t 的水资源<sup>[7]</sup>。产品和服务生产过程中所需要的水资源是产品所包含的虚拟水<sup>[6,7]</sup>。虚拟水以“看不见”的形式蕴涵在各种产品中, 人类消费各种产品和服务实质上就是间接地消费水资源。

类似于生态足迹(ecological footprint, EF)的概念<sup>[8]</sup>, 水资源足迹(water footprints, WF)的概念<sup>[3]</sup>是: 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量。这里的所有资源包括人类生活所必须的食物、日用工业消费品、生活直接消费的实体水资源和为人类提供生态系统服务和功能的生态环境资源。从 WF 定义出发, 人口规模、消费条件、食物消费模式及消费数量决定

收稿日期: 2004-07-05; 修订日期: 2004-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(40235053; 40201019)

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

了特定区域社会群体生活消费所需的水资源量。人类除直接消费实体水资源外, 产品形式的虚拟水消费也是人类消费水资源的主要形式, 因此人类产品消费中的虚拟水就成为水资源足迹的主要组成部分<sup>[3]</sup>。

产品消费种类、单位产品虚拟水含量及消费数量等决定虚拟水消费的数量。产品消费种类与特定消费人群的经济消费能力、消费习惯(文化)、宗教信仰等(食物消费模式)密切相关<sup>[9]</sup>。因此, 不同消费结构下不同群体生活所需的水资源数量也会存在一定差异。序列年的水资源足迹研究可以分析不同消费模式对水资源的消耗情况, 反映消费模式演变对水资源系统的压力变化, 为科学利用有限的水资源提供有益的决策依据。

### 1.2 水资源足迹的计量

各种产品中“蕴涵”着大量的水资源, 产品流通使一个地区的居民往往能消费到其它区域生产的各种产品, 从而间接消费“异地”的水资源。因此, 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除。一个国家或地区的水资源足迹可表示为<sup>[3]</sup>

$$WF = PVW_{\text{exp-enditure}} + RW_{\text{exp-enditure}} + ENV_{\text{exp-enditure}} + NWVI \quad (1)$$

式中  $WF$  为一个国家或地区的水资源足迹;  $PVW_{\text{exp-enditure}}$  为消费的本地产品虚拟水含量;  $RW_{\text{exp-enditure}}$  为生活利用的实体水消费量;  $NWVI$  为净进口虚拟水消费量;  $ENV_{\text{exp-enditure}}$  为生态用水。

### 1.3 1989—2003年甘肃省单位产品的虚拟水含量

水资源足迹的计算尝试采用账户方式解释水资源在社会经济系统中的迁移转换。农产品是当前世界贸易中虚拟水含量最大的商品, 其虚拟水含量计算采用联合国粮农组织(FAO)推荐的标准彭曼方法计算; 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很少, 因此通常采用估计方法或忽略不计<sup>[3]</sup>。

农产品虚拟水含量计算应考虑不同年份的气候条件波动、农业耕作与管理技术的提高及加工技术的改进等, 因而农产品虚拟水含量随时间变化。考虑到15年长时间尺度上的气候变化幅度一般较小, 因而本文计算的气候条件以多年平均气候值为基础。由于进口产品的虚拟水含量计算所需的数据过于庞大且获取较困难, 本文中进口产品的虚拟水含量计算采用了虚拟水使用者角度下的计算思路。对该方法及其计算国内已经有一些介绍和研究<sup>[3~5]</sup>。在计算不同水平年的作物需水时, 首先采用联合国粮农组织(FAO)推荐的标准彭曼公式, 计算敦煌、酒泉、张掖、民勤、兰州、平凉、天水等7个地区11种主要作物需水, 然后根据不同水平年的播种生产情况分别进行面积加权, 调整得到不同年份不同类农作物的平均需水量, 最后根据各水平年单位面积产量和加工转换率获得单位农产品的虚拟水含量(表1)。

表1 1989—2003年主要农产品单位虚拟水含量变化情况

Table 1 Virtual water content change of main consumable from 1989 to 2003

年份	粮食	植物油	蔬菜	食糖	烟叶	白酒	水果	棉花
1989	2 964.0	9.6209	0.1111	1 851.6	4.1470	3 705.0	2.7386	14.6947
1990	2 808.6	8.9236	0.1141	1 807.8	4.1470	3 510.8	2.6410	12.1564
1991	2 902.0	9.3949	0.1172	1 807.8	4.1470	3 627.5	2.5991	10.5187
1992	2 816.0	8.4000	0.1187	1 533.2	4.1470	3 519.9	2.4338	11.3401
1993	2 517.6	8.1718	0.1145	1 896.9	4.4890	3 147.1	2.2486	15.0358
1994	2 741.5	8.2947	0.1149	1 676.0	5.2780	3 426.8	2.1535	13.6138
1995	3 133.4	10.2830	0.1314	1 859.2	5.2696	3 916.7	2.1591	12.7278
1996	2 392.4	8.9147	0.1316	1 626.3	4.0901	2 990.5	2.0587	10.2397
1997	2 633.0	8.9147	0.1339	1 639.8	4.4538	3 291.2	1.8946	10.2397
1998	2 221.4	5.9986	0.1400	1 613.7	3.8395	2 776.8	1.6366	8.8897
1999	2 395.5	6.3981	0.1384	1 717.4	4.5883	2 994.3	1.7011	11.6481
2000	2 630.4	6.1936	0.1354	1 805.2	5.0515	3 288.1	1.3764	9.7761
2001	2 359.5	7.5663	0.1016	1 596.1	4.9143	2 949.3	1.4393	9.3257
2002	2 227.4	6.4259	0.1428	1 570.7	5.4384	2 784.3	1.3285	9.4357
2003	2 120.4	6.6146	0.1240	1 662.9	3.9108	2 650.5	1.3442	9.7854

## 2 1989—2003 年甘肃省的水资源足迹计算

### 2.1 计算资料

根据甘肃省的实际情况及资料的可获得性, 主要从 4 个方面对 1989—2003 年甘肃省的水资源足迹进行衡量: ① 居民主要消费品的虚拟水量; ② 虚拟水贸易进出口量; ③ 生活实体水消费量; ④ 生态环境用水。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 国际上有关虚拟水研究的中国动物产品虚拟水含量计算成果<sup>[9]</sup>; ③ 统计资料和相关文献<sup>[10-11]</sup>, 如《甘肃年鉴》(1990—2004 年)和《甘肃省水资源公报 1991—2003 年》等<sup>①</sup>。

### 2.2 居民主要产品虚拟水消费

根据单位农产品虚拟水含量(表 1)和相关统计数据<sup>[10, 11]</sup>, 计算了 1989—2003 年甘肃省城乡居民主要产品虚拟水消费总量(表 2、图 1)。1989 年以来, 甘肃省人均城镇居民的虚拟水消费总量除 1991、1992、1994、1997、2002、2003 年较上年有少许上升外, 总体呈现曲折下降趋势, 消费量由 1989 年的  $868 \text{ m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$  下降到 2003 年的  $664 \text{ m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ , 年平均下降  $1.56\%$  ( $13.6 \text{ m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ )。农村居民虚拟水消费量除 1991、1995、1997 和 2000 年较上一年有少许上升外, 总体上也呈现曲折下降趋势, 虚拟水消费量由 1989 年的  $712 \text{ m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$  下降到 2003 年的  $595 \text{ m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ , 年平均下降  $1.09\%$  ( $7.79 \text{ m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ )。15 年来, 城镇居民的虚拟水消费量平均每年比农村居民高  $89.45 \text{ m}^3$ , 但城镇居民的虚拟水消费的下降速度快于农村居民, 城乡居民虚拟水消费量差额不断缩小, 到 2002 年基本持平。这种下降得益于生产水平和消费水平等的提高和改善, 如单位面积粮食产量的提高和粮食消费量的下降等<sup>[10, 11]</sup>。城乡居民虚拟水消费量变化(图 1)的相关性分析表明, 15 年中城乡居民虚拟水消费量在 0.01 水平双检验下显著相关(相关系数为 0.693), 其中 1989—1999 年 11 年的相关性更高(相关系数为 0.886), 曲线相似性比较高, 表明城乡居民农产品虚拟水消费量变化过程比较相似。

### 2.3 净进口虚拟水、工业品虚拟水、生态环境用水和实体水消费

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除, 而进口产品虚拟水应该加到水资源消费中。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。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使其虚拟水核算复杂; 其次, 工业品不同于农产品, 一般属于耐用(可折旧)产品。因此本文中工业品虚拟水消费的核算采用估计方法。从甘肃省工农业的实际用水看, 以 2000 年为例, 工业用水不到农业用水的  $1/6$ 。考虑到工业用品可折回这一特点, 文中以当年城镇居民农产品虚拟水消费量的  $8\%$  作为城市居民使用工业品所消费的虚拟水量, 当年农村居民农产品虚拟水消费量的  $5\%$  作为农村居民使用工业品所消费的虚拟水量。

生态环境用水的处理。生态环境用水是现状年生态系统中天然生态和人工生态建设所消耗的水资源数量, “九五”国家重点科技攻关项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”的计算表明, 河西走廊 1995 年可控生态环境耗水为  $24.9 \text{ 亿 m}^3$ <sup>[12]</sup>。除河西走廊外, 甘肃省其他区域的生态耗水研究案例很少。本文以河西走廊的面积比例 ( $27.41 \text{ 万 km}^2$ , 占  $60.32\%$ ) 和文献<sup>[12]</sup>的结果为基础, 计算甘肃省 1989—2003 年各年总的生态环境用水量。考虑到 20 世纪 90 年代以来社会生产消费中经济用水不断挤占生态环境用水这一事实, 其他序列年的处理以 1995 年为基础按每年  $2\%$  的速度增减。

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。实体水消费取自于 1991、1994—2003 年的《甘肃省水资源公报》, 1989—1990 年、1992—1993 年采用定额计算的方法获得。

① 甘肃省水利厅. 甘肃省水资源公报(1991、1994—2003 年共 11 年). 因为《甘肃省水资源公报》从 1994 年才开始连续出版, 所以 1989—1990 年以及 1992—1993 年城镇和农村的实体水消费量根据当年的定额计算得到。

表2 1989—2003年甘肃省城乡居民人均虚拟水消费

Table 2 Virtual water consumption of city and country citizens in Gansu from 1989 to 2003

m <sup>3</sup> /人·a					
年份	城镇居民	农村居民	年份	城镇居民	农村居民
1989	868.00	712.51	1997	692.73	642.37
1990	806.90	701.47	1998	677.89	603.23
1991	867.30	740.59	1999	658.62	600.56
1992	904.73	693.12	2000	652.14	703.30
1993	814.40	681.13	2001	639.64	671.21
1994	882.31	677.75	2002	648.20	634.40
1995	822.17	696.61	2003	664.61	595.68
1996	669.59	573.52	平均	751.28	661.83

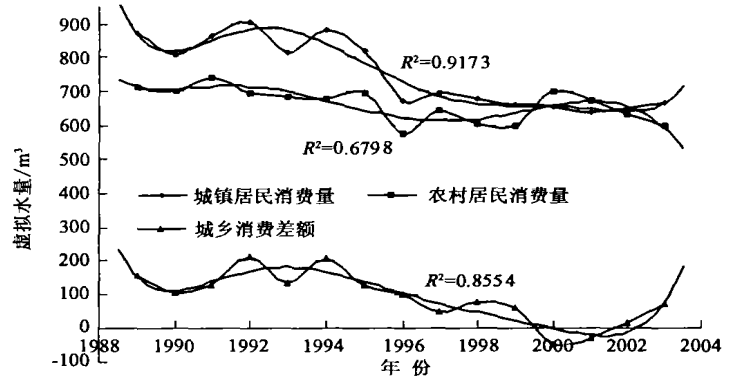


图1 1989—2003年甘肃省城乡居民主要产品虚拟水消费量变化

Fig. 1 Virtual water consumption variation of city and country citizens in Gansu from 1989 to 2003

2.4 1989—2003年甘肃省的水资源足迹

依据式(1)和上面的计算分析, 得到甘肃省1989—2003年的水资源足迹。结果表明, 1989年以来, 甘肃省全社会水资源足迹总量稳定在220亿~240亿m<sup>3</sup>/a, 总体上呈现少量下降趋势(表3)。因此, 从水资源消费的量上看, 社会人口的增加(表3)并没有加大甘肃省水资源系统的压力。这种下降或持平得益于全社会生产力的提高, 如农业生产技术的改善和单位面积产品产出的提高、工业生产技术的改进(例如上述水足迹总量偏大年份与灾害面积的相关仅为0.407, 因此可预见其还与生产技术、生产条件等改善有关)。检验表明, 生态环境用水采用上述处理方法并不影响水足迹的变化趋势。如, 忽略生态环境用水后, 剩余部分的水足迹与全社会当年总的水足迹之间仍呈现显著相关(0.01水平双尾检验, 相关系数为0.923)。

表3 甘肃省1989—2003年的水资源足迹及其构成

Table 3 Water footprint of Gansu Province from 1989 to 2003

年份	城镇居民虚拟水 与实体水消费			农村居民虚拟水 与实体水消费			城镇农村人口		生态 环境 用水 /亿m <sup>3</sup>	全省总 水资源 足迹 /亿m <sup>3</sup>	全省 人均 水足迹 /m <sup>3</sup>	城镇居 民人均 水足迹 /m <sup>3</sup>	农村居 民人均 水足迹 /m <sup>3</sup>
	农产品 /m <sup>3</sup>	工业品 /m <sup>3</sup>	实体水 /亿m <sup>3</sup>	农产品 /m <sup>3</sup>	工业品 /m <sup>3</sup>	实体水 /亿m <sup>3</sup>	城镇人口 /万人	农村人口 /万人					
1989	868.0	69.4	1.4148	712.5	35.6	4.8427	471.59	1699.19	214.2	224.1	1032.2	1181.6	990.8
1990	806.9	64.6	1.5405	701.5	35.1	4.9217	496.93	1757.74	202.1	224.8	997.1	1104.6	966.7
1991	867.3	69.4	1.6276	740.6	37.0	4.8848	508.62	1776.30	195.6	237.0	1037.1	1164.2	1000.7
1992	904.7	72.4	1.7175	693.1	34.7	4.8431	520.46	1793.73	189.3	231.8	1001.5	1199.4	944.1
1993	814.4	65.2	1.8108	681.1	34.1	4.7128	532.60	1812.63	183.1	225.9	963.4	1096.7	924.3
1994	882.3	70.6	1.9704	677.8	33.9	4.7845	545.57	1832.68	177.0	231.3	972.5	1166.0	914.8
1995	822.2	65.8	2.0427	696.6	34.8	4.0177	564.87	1873.08	169.3	234.5	961.9	1093.5	922.2
1996	669.6	53.6	2.1113	573.5	28.7	4.0916	577.99	1888.87	164.0	202.2	819.7	923.7	787.8
1997	692.7	55.4	2.8041	642.4	32.1	2.5663	590.88	1903.32	158.9	217.6	872.4	954.5	847.0
1998	677.9	54.2	2.8751	603.2	30.2	2.5808	600.62	1918.75	154.2	209.8	832.8	934.2	801.0
1999	658.6	52.7	3.3385	600.6	30.0	3.0782	612.00	1930.58	149.8	209.8	825.0	915.6	796.3
2000	652.1	52.2	3.4300	703.3	35.2	3.0800	613.91	1942.98	145.9	230.5	901.6	906.1	900.3
2001	639.6	51.2	4.4003	671.2	33.6	2.9093	631.19	1944.05	142.0	224.5	871.7	902.5	861.7
2002	648.2	51.9	4.4809	634.4	31.7	2.9194	673.03	1919.55	138.2	218.2	841.7	904.9	819.6
2003	664.6	53.2	4.5723	595.7	29.8	2.7938	712.79	1890.55	134.9	211.9	813.9	916.8	775.2
年均	751.3	60.1	2.6758	661.8	33.1	3.8018	576.87	1858.93	167.9	222.3	916.3	1024.3	883.5

15年的甘肃省全社会总水资源足迹中, 虚拟水消费(包括农产品和工业产品)、生活实体水的利用和生态环境用水年均分别所占比例为79.2%、2.9%、18.3%。居民通过虚拟水方式消费的水资源数量是实体水消费的30倍, 而享受环境服务所占用的水资源也是实体水消费的7倍多。虚拟水消费中, 城镇、乡村居民植物类产品的

虚拟水消费分别以年平均 3.11% (20.23 m<sup>3</sup>/人·a)、1.74% (10.64 m<sup>3</sup>/人·a) 呈下降趋势; 动物类产品则分别以年平均 3.86% (6.96 m<sup>3</sup>/人·a)、2.87% (2.39 m<sup>3</sup>/人·a) 呈现不断上升; 副食类产品虚拟水消费中, 农村居民增长, 而城镇居民呈现较小下降(表 4)。

表 4 1989—2003 年人均作物类、动物类、副食类产品虚拟水消费量

Table 4 Average virtual water consumption of vegetation, animal and secondary products

m<sup>3</sup>/人·a

年份	作物类		动物类		副食类		年份	作物类		动物类		副食类	
	城镇居民	农村居民	城镇居民	农村居民	城镇居民	农村居民		城镇居民	农村居民	城镇居民	农村居民	城镇居民	农村居民
1989	649.45	612.16	180.26	83.34	38.29	17.01	1998	433.13	507.10	214.13	71.90	30.62	24.24
1990	578.93	599.14	193.98	85.35	33.99	16.97	1999	392.91	510.01	229.23	71.09	36.49	19.46
1991	621.95	620.16	213.54	92.77	31.81	27.66	2000	367.69	570.96	245.48	109.75	38.97	22.59
1992	618.02	608.55	250.40	65.19	36.31	19.37	2001	366.06	533.58	235.25	108.70	38.33	28.93
1993	568.25	581.04	202.54	73.38	43.61	26.70	2002	358.78	499.32	250.75	104.63	38.68	30.46
1994	610.31	576.88	230.03	71.39	41.96	29.49	2003	346.05	452.60	284.65	119.17	33.91	23.90
1995	571.04	629.00	201.87	48.83	49.26	18.78	年均	490.63	557.79	223.61	81.01	37.04	23.02
1996	434.19	512.02	202.75	46.15	32.64	15.35	年均增减	-20.23	-10.64	+6.96	+2.39	-0.29	+0.46
1997	442.75	554.38	219.23	63.56	30.74	24.43	年增减率 %	-3.11	-1.74	+3.86	+2.87	-0.76	+2.70

注: 作物类包括: 粮食、食用植物油、蔬菜、瓜果、棉花; 动物类包括: 猪肉、牛肉、羊肉、家禽、蛋类、鱼虾、奶类; 副食类包括: 食粮、卷烟、白酒、啤酒、饮料、糕点。

从城乡水足迹消费总量上看, 全省城镇居民和农村居民的平均水足迹分别为 59.68 亿 m<sup>3</sup>/a (26.27%)、167.79 亿 m<sup>3</sup>/a (73.73%), 而同期城镇居民人口、农村居民人口的比例平均为 23.61%、76.39%, 总足迹中扣除生态环境用水部分后, 城镇居民的水足迹平均比农村居民高 3.33%。

城乡居民的水资源足迹差异比较表明, 城镇人均水足迹在 15 年中均高于农村, 相比食物类产品虚拟水消费差异, 城乡居民水足迹差异进一步扩大, 高达 140.8 m<sup>3</sup>/人·a (城镇居民平均 1024.3 m<sup>3</sup>/人·a, 农村居民平均 883.5 m<sup>3</sup>/人·a), 差距加大的主要原因在于城镇人均工业品虚拟水和实体水消费明显高于农村居民消费。

### 3 水资源足迹与消费模式分析

消费模式是在一定的消费观念、消费态度支配下, 由社会制度、生产力状况、区域自然资源(包括地理环境)、经济发展水平、民族习惯等因素影响下形成的消费格局, 它主要体现在消费结构、消费观念和消费行为等方面<sup>[13]</sup>。本文分析消费结构(主要是膳食结构)状况对区域水资源足迹的影响。

#### 3.1 1989—2003 年甘肃省城乡居民的膳食结构演变与虚拟水消费

1989 年以来, 随着居民经济收入增加及消费观念等的演变, 甘肃省城乡居民的膳食结构发生了较大的变化<sup>[10, 11]</sup>。城镇居民膳食结构的演变特点是: 粮食、烟草、白酒类消费呈逐渐下降趋势, 食用植物油、蛋类消费曲折增长, 蔬菜消费稳中有降, 动物性食品、啤酒及饮料、水果、奶类消费明显增加, 直接利用棉布的服装消费数量逐年减少到 0。农村居民膳食结构演变特点为: 粮食消费保持稳定; 植物油、肉蛋奶类食物消费总量明显上升, 蔬菜消费量呈现小幅下降; 副食消费除烟草有所下降外, 其他如酒类、糕点等消费明显上升, 棉布消费量逐年减少。15 年中, 城乡居民主要消费品的实物量方面, 农村居民除粮食(按原粮计算)消费量平均高出城市居民 91.07 kg, 其它产品消费量均低于城镇居民(比城市居民消费量低 14%~82%); 反映在虚拟水消费上, 城镇居民消费的产品虚拟水量(2000、2001 年除外)明显高于农村居民。

尽管城乡居民在食物消费结构中的数量上各年增减略有变化并各有特点, 但总体上除 1991、1992 和 1994 年外, 城乡居民人均虚拟水消费量基本呈下降趋势。统计检验表明, 城镇居民虚拟水消费量与粮食消费量间密切相关(相关系数为 0.948), 城市居民虚拟水消费的下降趋势主要由粮食消费量不断减少引起; 而农村居民虚拟水消费总量和粮食消费量相关不明显, 其虚拟水消费数量的逐步降低与消费结构的变化有关, 如消费结构的

多样化发展等。

### 3.2 消费结构多样性与虚拟水消费

生态系统的多样性是近年来生物学和生态学中研究的热点问题之一, Tilman 研究牧草地生态系统发现了多样性与生产能力和有限资源的利用效率之间存在显著的正相关关系<sup>[14]</sup>。从进化论的角度来看, 经济系统和生态系统存在类质同像现象, 因此, 多样性可用于消费结构与水资源利用(虚拟水消费量)之间关系的研究。借鉴经济系统多样性指数研究<sup>[15, 16]</sup>, 采用 Shannon-Weaver 公式来测度虚拟水消费多样性与虚拟水消费数量的关系:

$$H = - \sum_i [p_i \ln p_i] \quad (2)$$

式中  $H$  为虚拟水消费多样性;  $p_i$  为各类虚拟水消费的比例, 消费类别包括粮食、食用植物油、蔬菜、瓜果、猪肉、牛肉、羊肉、家禽、蛋类、鱼虾、奶类、食糖、卷烟、白酒、啤酒、饮料、糕点。Shannon-Weaver 公式不是一个单调函数, 对给定食物消费的组成而言, 各种食物的虚拟水消费分配越接近平等, 则多样性越高, 因此食物消费的多样性高低反映了消费水平的高低。

表5是根据式(2)计算得到的城乡居民虚拟水消费的多样性指数, 可以看到, 城镇居民的多样性指数明显高于农村居民。15年来, 甘肃省城镇居民虚拟水消费的多样性指数呈稳步增长趋势(15年来共增加0.43), 即居民消费品的分布逐步分散化, 饮食单一化结构得到改善; 具体而言, 在虚拟水消费上, 作物类产品消费的虚拟水量不断减少, 年均减少 20.23  $\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ ; 而动物类产品消费的虚拟水则呈现逐渐增加趋势, 年均增加 6.96  $\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ ; 副食类产品消费的虚拟水含量基本持平(表4)。可见, 消费结构多样性的提高有利于降低人类对水资源系统的压力。这可以部分解释人口增加和消费水平提高并没有使水资源足迹显著增加的原因。

农村居民虚拟水消费量与其消费结构的多样性关系比城镇居民的关系复杂。尽管多样指数由1989年的1.24不规则地提高到2003年的1.59, 增加了0.35, 但多样性增加的过程中反常年份出现比城镇居民多而复杂。一方面, 随多样性的增加, 农村居民人均虚拟水消费的数量基本呈现减少趋势; 另一方面, 农村居民消费结构的调整比城镇居民更敏感而脆弱, 其主要原因为: ①农村居民粮食性产品的消费量变化较小, 因而虚拟水消费比例的变化不大; ②与城镇居民相比, 农村居民收入长期偏低, 经济能力远远低于城镇居民, 合理搭配消费的动力低于城镇居民(多样性指数增加慢于城镇居民0.08), 因而人均虚拟水消费年均减幅明显低于城镇居民。因此, 减少农村居民消费粮食的数量和增加多样性, 有利于减小对水资源系统的压力。

## 4 结 论

人类通过消费水资源提供的产品和服务作用并影响水资源系统。水资源足迹指标, 能较真实地刻画一个人、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, 反映人类对水资源系统的真实压力。在不降低人均水资源消费需求的情况下, 虚拟水贸易可以较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有效降低人均水资源足迹, 从而降低人类对水资源系统的压力。因此, 对水资源短缺的地区而言, 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, 通过诸如虚拟水贸易、改善消费模式来间接“增加”水资源供给。

对可持续性而言, 一个时段的水资源足迹也是一种静态的指标<sup>[3]</sup>, 时间序列比单一时段能提供更多的信息, 政策意义明显。通过对甘肃省1989—2003年的序列年水资源足迹研究发现, 15年来甘肃省全社会水资源

表5 1989—2003年城乡居民虚拟水消费多样性  
Table 5 Diversity index of virtual water consumption  
of city and country citizens from 1989 to 2003

年份	多样性指数		年份	多样性指数	
	城镇居民	农村居民		城镇居民	农村居民
1989	1.84	1.24	1997	2.11	1.29
1990	1.90	1.26	1998	2.14	1.39
1991	1.86	1.34	1999	2.20	1.24
1992	1.95	1.28	2000	2.23	1.36
1993	1.97	1.30	2001	2.25	1.52
1994	2.02	1.26	2002	2.24	1.53
1995	2.00	1.05	2003	2.27	1.59
1996	2.12	1.20	平均	2.07	1.32

足迹总量基本稳定在 220~240 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 总体上呈现微量下降趋势, 人口增加和消费水平提高并没有明显增加水资源需求压力。无论是城镇居民还是农村居民, 人均水资源足迹均呈下降趋势, 年均分别下降 18.33  $\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ 和 15.05  $\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{a}$ 。分析表明, 随着消费结构多样化的增加, 人均虚拟水消费数量呈下降趋势, 因此, 增加消费的多样性, 改善居民消费结构和营养水平有利于降低水资源系统的压力。改善消费模式在“节流”的同时, 又可为干旱地区的生态环境用水开辟“新源”, 对干旱地区的水资源利用具有一定意义。

水资源足迹计算的影响因素很多, 本文的水资源足迹计算还只是一种粗略保守的估计。如果考虑人口增加和消费水平提高对水环境的影响, 本文的计算结果可能偏低, 结论也有待进一步改进。另外, 在计算虚拟水消费方面, 受限于统计资料等问题, 考虑的产品类型有限且较粗略; 工业产品虚拟水消费、单位动物产品虚拟水含量等等采用了估计和参考已有研究成果的方法; 消费模式与水资源足迹的关系分析仅仅考虑了居民日常生活消费的主要产品类型。下一步研究需要将水环境恶化产生的水足迹考虑进来, 同时从营养角度研究将能深入揭示消费模式对水资源系统的影响状况。可以预见的是, 从消费角度探讨区域水资源可持续管理, 对区域生产的优化安排和区域水资源系统压力的缓解, 将具有更明确的科学和政策涵义。

#### 参考文献:

- [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(5): 607—616
- [2] 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.
- [3] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000 年的水资源足迹[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 692—700.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Hoekstra A Y. Virtual water trade: an introduction[A]. In: Hoekstra A Y. Virtual Water Trade; Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[C]. Value of Water Research Report Series No12. IHE DELFT, 2003. 13—23.
- [8] 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? [M]. Centre for Sustainability Studies, Universidad Anahuac de Xalapa, Mexico, 1997.
- [9] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international trade of livestock and livestock products[A]. In: Hoekstra A Y edited. Virtual Water Trade; Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade [C]. Value of Water Research Report Series No12. IHE DELFT, 2003.
- [10] 甘肃省统计局. 甘肃统计年鉴 1990—1994[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990—1994.
- [11] 甘肃年鉴编委会. 甘肃年鉴 1995—2004[M]. 北京: 中国统计出版社, 1995—2004.
- [12] 王 浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置和承载力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 129—132.
- [13] 聂月爱. 人口素质与消费模式[J]. 理论探索, 2003, 3: 48.
- [14] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. Nature, 1996, 379: 718—720.
- [15] Xu Zhong-min, Cheng Guo-dong, Chen Dong-jin, et al. Economic diversity, development capacity and sustainable development of China [J]. Ecological economics, 2002, 40(3): 369—378.
- [16] 徐中民, 张志强, 程国栋. 生态经济学理论方法与应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 90—92.

## Analysis of water footprint and consumption pattern in Gansu Province<sup>\*</sup>

LONG Ai-hua<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>2</sup>, XU Zhong-min<sup>1</sup>, SU Zhi-yong<sup>3</sup>

(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 Agroecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Increasing shortage of water resources is an uncontroversial fact with the population growth and the economy development in Gansu Province of Northwest China. How to alleviate the pressing of water resource is a major issue faced by decision-makers. Water footprint research explores a new viewpoint to water resource management. In this paper, Gansu Province is taken as a case study to investigate the variation of water footprint and its relationship with the consumption pattern variation since 1989. The results indicate the virtual water consumed almost decreases year by year. Regardless of some degraded water environment, the results show that the water footprint doesn't increased as expected, or even remains at  $220 \times 10^8 - 240 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , while the population increases, the economy scales up and the consumption level goes up. The paper also inspects the relationship between the virtual water consumption, the water footprint and the consumption pattern variation since 1989, using the Shannon-Weaver equation. We find that the increase of the consumption diversities can reduce the water footprint, and lessen the stress of water resource system. Some policy implications of the water footprint and the consumption patterns are discussed in the last section.

**Key words:** water footprint; virtual water; consumption patterns; Gansu Province

## 《水资源系统工程》出版

金菊良、丁晶教授的专著《水资源系统工程》已由四川科学技术出版社出版。该书从方法论的角度,提出了由系统优化方法、建模方法、预测方法、模拟方法、评价方法和决策分析方法组成的现代应用系统工程新的理论体系。在该体系下,从系统优化方法这一现代系统工程的“核心”切入,提出了基于二进制编码的加速遗传算法、基于实数编码的加速遗传算法和基于整数编码的单亲遗传算法等三套系统优化的通用算法,然后把它们系统地与神经网络理论、非线性时间序列分析、蒙特卡罗方法、投影寻踪技术、相似理论、层次分析法、决策分析方法、系统风险管理等现代系统工程其它方法进行综合集成,形成了一系列算法步骤完备的系统工程新方法,并以水资源复杂系统问题为例,给出了这些通用新方法的完整的应用技术,读者可据此迅速掌握这些方法的原理方法与计算技术,并有所创新。该书可作为高等学校水利、农业、资源、环境、土木、市政、经济管理、应用数学及相关专业的本科高年级学生、硕士生和博士生的教材及教学参考书,也可作为这些专业的科学研究人员的培训教材和自学参考书。该书自2002年出版以来,得到了水利、农业、环境、资源等领域科学人员的广泛应用,已被引用350次以上。该书汇集了作者近10年来50篇论著的最新成果,37.7万字,定价27元,免费邮寄。联系人:合肥工业大学土建学院水利系金菊良,邮编:230009;电话:(0551)2903357; E-mail: JINJL66@xinhuanet.com.