

文章编号:1000-694X(2011)04-1065-07

张掖市社会经济系统水循环过程研究与水量估算

王 勇^{1,2}, 肖洪浪², 李彩芝², 赵良菊², 邹松兵², 任 娟²

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 生态水文和流域科学重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 采用投入产出分析方法, 估算了张掖市各部门产品中的虚拟水含量; 基于对各产品转化和流动的跟踪, 系统研究了本地实体水资源与外地流入虚拟水资源在张掖市社会经济系统各环节中的流动与转化过程。结果表明, 种植业部门的实体水转化与虚拟水流动构成了张掖市社会经济系统水循环的主体, 外地流入的虚拟水量较少, 且主要集中于水资源稀疏型产品; 经济生产对种植业产品较低的消耗水平导致了大量虚拟水的流出。认为增强种植业产品在社会经济系统中的循环强度是张掖市降低水资源流失以及提高水资源利用效率的有效手段。

关键词: 实体水; 虚拟水; 投入产出; 水循环; 社会经济系统

中图分类号: F062.2 文献标识码: A

水文循环研究为人类剖析自然界中水的运动过程与规律提供了一个科学的理论框架, 并一直在水资源开发利用和洪涝灾害防御的过程中发挥着重要的技术支撑作用。然而, 长期以来, 由于开发和改造自然环境系统中的水资源一直是人类水利活动的中心思想, 人们往往关注自然界中的水文过程, 而忽视了社会经济系统中水的运动过程。1997 年, 英国学者 Merrett^[1] 提出了与“Hydrological Cycle”相对应的术语“Hydrosocial Cycle”, 并绘制了社会水循环的简要示意图。随后, 国内部分学者也围绕着社会水循环开展了相关的研究, 如陈庆秋等^[2] 综合城市供水、用水和污水排放等环节中水的流动过程定义了社会水循环, 并提出了社会水循环的概念模型; 陈家琦等^[3] 将社会水循环定义为自然水循环的“人工侧支循环”, 并探讨了健康社会水循环的实现途径; 王浩等^[4] 认为流域水循环的内在动力已由过去的自然驱动演变为现在的自然-人工二元驱动, 并在此基础上提出了“自然-人工”二元水循环学说; 贾绍凤等^[5] 则基于对水资源开发利用中人类活动影响的认识提出了社会经济系统水循环研究需要关注的问题。尽管以上学者从不同角度研究了社会经济系统的水循环, 但他们的研究却大都仅关注物理状态的水在社会经济系统中使用与流动, 缺乏水资源在经济生产中的形式转化及其价值转移研究。然而, 从形式转化角度揭示资源流动过程及其规律却是资源可持续利用领域的重大科学问题之一^[6]。

1998 年, 英国学者 Allan^[7] 首先提出了虚拟水的概念, 并将其定义为生产农产品所需要的水资源量。之后, Hoekstra^[8] 对虚拟水概念作了进一步补充和拓展, 将其定义为生产商品和服务所需要的水资源量。从科学层次上看, 虚拟水概念的提出不仅提供了研究水资源迁移、储存和利用的新手段, 而且还拓宽了水循环的研究领域, 使得社会经济系统水循环研究突破了以往必须围绕“实体水”本身展开的观念束缚, 为从深层次上探讨区域水资源问题提供了新的思路^[9-12]。Turton 等^[13] 在研究中指出, 以前所研究的水循环过程在内涵上已经不再是单纯的自然水文循环, 而是增添了社会经济性质的新含义。

张掖市地处西北干旱区, 可用水资源总量有限, 人水矛盾突出^[14-16]。尽管虚拟水战略可以解决区域水资源短缺问题^[9,17], 但由于缺乏对社会经济系统中虚拟水流动与转化现状的深入认识, 目前仍然难以找到实施虚拟水战略的有效措施。笔者基于对各部门产品转化和流动的跟踪, 系统研究了张掖市本地实体水资源与外地流入虚拟水资源在其社会经济系统各环节中的流动与转化过程, 并深入分析了引起张掖市大量虚拟水流出的原因与机理。研究成果可为张掖市虚拟水战略的实施提供参考和帮助。

1 社会经济系统水循环过程的认识

产品和服务是虚拟水转化和流动的载体, 跟踪各经济部门产品和服务的运动是研究社会经济系统

收稿日期: 2010-10-29; 改回日期: 2010-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001378); 国家自然科学基金中国西部环境和生态科学研究计划重点项目(90702001)联合资助

作者简介: 王勇(1978—), 男, 山东滨州人, 博士, 主要从事生态经济方面的研究。Email: yongw1211@yic.ac.cn

水循环的基础。基于对产品的加工、生产、运输、销售和消费等生命阶段的认识,图 1 展示了社会经济系统水循环的基本过程。如图所示,一个地区社会经济系统中的水循环首先开始于这个地区社会生活与经济生产从自然界中的取水和用水。各经济部门将开采的水资源作为生产要素用于产品和服务的生产,物理状态的水就会转化为虚拟水,并“嵌入”到各部门的产品中。产出产品中,一部分形成各部门产品的最终产出,用于本地区固定资产的形成、存货的

增加、居民社会生活的消费以及地区间的贸易;还有一部分产品则需要返回生产过程,用作其他经济部门生产的“原料”,这就是产出产品的中间使用^[18]。在这个过程中,“嵌入”各部门产品中的虚拟水伴随着产品的流动而在社会经济系统中形成“虚拟水流”。此外,在商品贸易中,也有一部分虚拟水随着外地产品流入到本地经济生产和社会生活中,参与本地区的社会经济系统水循环。社会生活和经济生产中产生的污水经相关处理后排入自然环境。

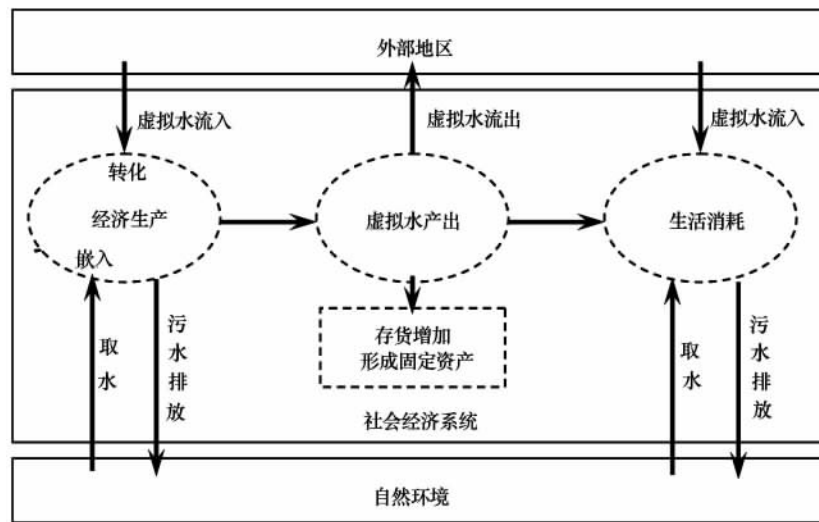


图 1 社会经济系统水循环的基本过程示意图

Fig. 1 The basic framework of water cycle in socio-economic system

从整个过程来看,本地水资源是社会经济系统水循环的主体,它首先在经济生产过程中转化为虚拟水,之后随产品和服务的运输、销售和消费而在社会经济系统中流动。外部地区流入的虚拟水,一部分参与了经济生产中虚拟水的转化,另一部分则直接流入社会生活中,用于居民消费。鉴于此,可将社会经济系统水循环划分为两个连续的过程:一是虚拟水的转化形成过程,二是虚拟水随产品在社会经济系统内的流动过程。在经济生产中,因为产业链上各经济部门之间不仅存在着产品直接消耗关系,而且还存在更为复杂的产品间接消耗关系^[18],所以相对于虚拟水的流动,虚拟水的转化过程则更为复杂一些。因此,社会经济系统水循环研究的关键就是阐明经济生产中本地实体水和外地虚拟水的转化过程。

2 研究方法 with 数据获取

2.1 研究方法

投入产出模型在定量分析经济部门间相互依存关系具有优势,因此,这里将该模型作为基本工具,

用于跟踪产业链上各经济部门虚拟水的转化和流动情况。在一个地区的经济生产中,外地流入产品和本地生产产品构成了该地区经济生产的中间使用,所以反映各经济部门产品产出与分配使用情况的投入产出模型可表示为:

$$z + k + y = (I - A)^{-1} \cdot y \quad (1)$$

式中: z 与 k 分别为本地产品和外地产品在经济生产中的中间使用向量; y 为各经济部门产品用于居民消耗、存货增加以及出口等用途的最终使用向量; $(I - A)^{-1}$ 即为能全面揭示各经济部门之间技术经济联系的 Leontief 逆矩阵,它反映一定的技术水平下,各经济部门生产单位最终使用产品时对其他经济部门的直接和间接消耗关系^[18]。

基于部门间的完全技术经济联系,便可从生产角度计算各经济部门产品的虚拟水含量系数,即单位产品中的虚拟水含量:

$$\omega^t = \omega^d \cdot (I - A)^{-1} \quad (2)$$

式中: ω^t 为各经济部门产品的虚拟水含量系数矩阵; ω^d 为各经济部门生产的用水系数,即单位产出的水资源使用量。关于经济部门用水投入产出研究

更为详细的分析,可参阅文献[19]。

为建立生产过程中各经济部门产品的相互转化与最终产出之间的联系,这里将(1)式中的最终使用向量(y)进行移动,并整理得到:

$$z + k = [(I - A)^{-1} - 1] \cdot y \quad (3)$$

在(3)式的基础上,若将最终使用向量(y)表示成对角矩阵的形式,便可得到本地和外地产品在各经济部门产品生产中的转化过程。

$$C = [(I - A)^{-1} - 1] \cdot \hat{y} \quad (4)$$

式中:符号“ $\hat{\cdot}$ ”表示将相应向量表示成对角矩阵的形式; C 为本地和外地产品在经济生产中转化过程的矩阵关系表达式,其元素 c_{ij} 表示经济部门 j 在生产中对本地和外地产品 i 的完全消耗量,包括了直接消耗和间接消耗。

为区分转化过程中的本地和外地产品,这里假设外地产品与本地产品具有相同的品质,且描述产品转化过程矩阵的每个组成元素可按照各部门产品中间使用中本地产品与外地产品的构成比例进行划分。外地产品是外地输入虚拟水转化和运动的载体,因此,基于外地产品转化的数量与各类产品的虚拟水含量系数即可得到外地输入虚拟水在经济生产中转化和运动过程的矩阵表达式(W^k):

$$W^k = \hat{w}^t \cdot \hat{k} \cdot (\hat{z} + \hat{k})^{-1} \cdot C \quad (5)$$

表 1 投入产出表中各部门产品的产出与使用情况

Table 1 Product output and utilization of each sector in the input-output of Zhangye City

生产部门	本地产品产出/万元			外地产品流入/万元			合计 /万元
	中间使用	居民消耗	存货增量	流出	中间使用	居民消耗	
种植业	117 076.97	79 142.00	6 326.00	117 984.60	440.14	764.86	321 734.57
畜牧业	34 911.12	13 580.39	17 247.05	38 096.43	3 132.10	6 183.61	113 150.71
其他农业	2 176.14	3 503.70	5 613.51	2 315.80	1 412.53	5 644.93	20 666.61
采选业	39 913.97	2 022.74	11 184.70	21 014.59	7 514.93	6 443.26	88 094.20
制造业	219 442.42	6 954.85	150 337.73	28 516.00	88 930.14	75 299.86	569 481.00
电力业	27 273.50	2 709.50	6 754.00	0.00	65 120.98	22 596.00	124 453.99
建筑业	63 418.08	27 208.46	94 812.78	86 890.68	22 887.34	75 395.52	370 612.86
运输业	62 305.04	2 128.83	15 481.00	25 135.13	6 620.91	4 542.34	116 213.25
服务业	129 904.83	29 700.71	124 117.22	54 979.23	33 627.60	54 049.93	426 379.52
合计	696 422.09	166 951.17	431 873.99	374 932.46	229 686.68	250 920.31	2 150 786.71

3 结果

3.1 本地实体水资源在经济生产中的转化

表 2 以矩阵的形式给出了张掖市水资源在经济生产中的转化情况。从横向看,表中每一行上的各个数值表示某一经济部门所使用的水资源随产品向其他经济部门的转化量,各行之和就是各经济部门的水资源使用量;从纵向看,表中每一列上的各个数

本地产品的转化则反映了各部门产品的直接和间接消耗关系。基于这种完全消耗关系和各经济部门的用水系数,便可获得本地自然环境中水资源在经济生产中转化为虚拟水的过程表达式(W^z):

$$W^z = \hat{w}^d \cdot [I - \hat{k} \cdot (\hat{z} + \hat{k})^{-1}] \cdot C \quad (6)$$

运移过程中的虚拟水量可根据各经济部门产品流量的构成比例进行计算,社会生活中居民对外地虚拟水的消费则可由流入各产品的数量与其虚拟水含量系数计算。

2.2 数据获取

张掖市投入产出表和各经济部门的用水情况是研究所需要的基础数据。投入产出表是基于张掖市 2002 年经济数据,采用常用于投入产出表调整的 RAS 法^[20]对陈东景^[21]编制的张掖市 2000 年 9 部门投入产出表进行数据更新,并重新平衡而获得的。该表反映了张掖市 2002 年经济运行中投入与产出的平衡关系,主要包括了各部门产品的总产出量、中间使用量、居民消费量、存货增加量以及流入和流出量等数据(表 1)。各经济部门的用水量则综合参考了甘肃省水利厅《甘肃 2002 年水资源公报》、张掖市水利局《农田灌溉统计年报》以及张掖市环保局《2002 年张掖市环境保护统计报表》中的数据。

值表示某一经济部门在生产过程中从其他经济部门所获取的虚拟水量,各列之和就是各经济部门的虚拟水产出量。从水资源转化的流量和存量角度来看,表中各经济部门之间水资源的交换就是本地水资源转化的流量;各行之和即为各经济部门的用水量,就是本地水资源在经济生产之处的初始存量;各列之和即为各经济部门的虚拟水产出量,就是本地水资源在经济生产之后的最终存量。

表中数据表明,各经济部门产出的虚拟水主要

是由本部门所使用的实体水转化而来。对于各农业部门来说,较多的水资源使用量使其成为各经济部门虚拟水转化和形成的主要来源,而部门内水的转化又使其具有较高的虚拟水产出。如种植业部门用于部门内部虚拟水转化的水量为143 065.32万 m³,占其总用水量的75.7%,剩余24.3%的水则主要用于制造业、畜牧业、建筑业和服务业等部门虚拟水的

转化和形成。相对于农业部门,各工业和服务业部门虽然使用较少的水资源,但是在经济生产中却能从农业部门获取较多的虚拟水。如制造业从种植业部门获取的虚拟水量为17 527.55万 m³,占其虚拟水总产出的83.6%。此外,尽管电力业部门在生产时消耗了一定的实体水资源,但是作为一种能源型行业部门,其所使用的水资源在经济生产中又以虚

表2 本地实体水资源在经济生产中的转化

Table 2 The transformation process of physical water in the economic production of Zhangye City

生产部门	种植业	畜牧业	其他农业	采选业	制造业	电力业	建筑业	运输业	服务业	合计
种植业	143 065.32	13 579.72	505.98	684.82	17 527.55	44.56	8 786.69	1 287.25	3 556.10	189 038.00
畜牧业	1 649.04	6 425.12	9.17	26.04	692.09	1.74	326.36	50.14	149.26	9 328.95
其他农业	138.78	40.30	11 046.48	26.32	151.21	1.25	123.13	33.78	590.95	12 152.20
采选业	11.90	3.16	0.58	215.39	50.37	1.47	92.80	6.28	19.88	401.82
制造业	251.65	81.05	11.72	59.05	2 197.22	4.09	770.33	104.31	273.21	3 752.62
电力业	101.59	21.75	3.93	102.18	269.72	402.64	399.66	51.02	160.25	1 512.74
建筑业	8.94	1.93	0.31	2.73	12.89	0.40	425.31	8.27	40.31	501.09
运输业	5.06	2.00	0.36	4.35	14.28	0.15	17.87	57.09	19.65	120.81
服务业	22.75	8.64	1.90	12.23	52.03	0.65	55.71	16.45	434.64	605.00
合计	145 255.03	20 163.66	11 580.42	1 133.11	20 967.35	456.96	10 997.86	1 614.59	5 244.25	217 413.22

注:表中数值的单位为万 m³。

拟水的形式随电力能源流入其他经济部门。

3.2 外地输入虚拟水在经济生产中的转化

表3同样以矩阵的形式给出了外地输入虚拟水在张掖市各经济部门中的转化情况。表中各行的数据表示各类外地输入虚拟水在各经济部门的转化量,各列的数值则表示各经济部门在经济生产中对各类外地输入虚拟水的使用量。表3表明,尽管各

农业部门在经济生产中从外地输入产品中获得相当数量的虚拟水,但是各经济部门对外地各农产品虚拟水的需求量却相对较小。相比之下,外地制造业和电力业产品中的虚拟水在张掖市虚拟水的转化过程中却占有相当重要的比重。如表3所示,随制造业和电力业产品流入到张掖市经济生产中的虚拟水总量为13 938.80万 m³,占经济生产对外地虚拟水总消耗量的71.0%。在转化关系中,外地制造业

表3 外地输入虚拟水资源在经济生产中的转化

Table 3 The transformation process of imported virtual water in the economic production of Zhangye City

生产部门	种植业	畜牧业	其他农业	采选业	制造业	电力业	建筑业	运输业	服务业	合计
种植业	105.51	62.09	2.31	3.13	80.14	0.20	40.18	5.89	16.26	315.71
畜牧业	486.20	68.62	2.70	7.68	204.05	0.51	96.22	14.78	44.01	924.78
其他农业	107.13	31.11	646.49	20.32	116.73	0.96	95.06	26.08	456.20	1 500.08
采选业	17.31	4.60	0.84	43.50	73.28	2.14	135.00	9.13	28.92	314.73
制造业	1 307.52	421.11	60.90	306.81	2 476.47	21.25	4 002.48	542.00	1 419.53	10 558.06
电力业	305.81	65.48	11.82	307.60	811.93	39.01	1 203.09	153.59	482.41	3 380.74
建筑业	104.54	22.51	3.63	31.87	150.68	4.72	478.45	96.75	471.37	1 364.52
运输业	19.91	7.85	1.42	17.13	56.16	0.58	70.26	31.19	77.29	281.79
服务业	97.65	37.08	8.15	52.51	223.33	2.79	239.14	70.60	264.76	996.00
合计	2 551.57	720.45	738.26	790.55	4 192.78	72.16	6 359.88	950.01	3 260.75	19 636.41

注:表中数值的单位为万 m³。

产品中的虚拟水主要转化为张掖市建筑业、制造业和服务业等经济部门的虚拟水产出,而外地电力业产品中的虚拟水则随着电力资源的输送而广泛参与张掖市各经济部门虚拟水的转化和形成。

3.3 虚拟水在社会经济系统中的流动

本地实体水资源与外地虚拟水资源经重新转化后,共产出237 049.63万 m³的虚拟水。表4给出了张掖市各经济部门虚拟水在社会经济系统中的流动情况。结果显示,种植业、制造业和畜牧业部门的虚拟

水主要用于满足当地居民社会生活的消费需求;制造业、建筑业、服务业和各农业部门的虚拟水主要随各部门产品的累积以及固定资产的增加而蓄积起来;种植业、畜牧业和建筑业等部门的虚拟水则主要随产品在商品贸易中流出研究地区。综合各经济部门虚拟水的流向来看,随产品在地区贸易中流出的虚拟水量最多,为115 762.87万 m³,占整个地区虚拟水总产出的48.8%。此外,张掖市居民社会生活对外地虚拟水的消费需求相对较少,仅为流出量的1/5,且主要集中于制造业、建筑业以及林、渔等农业部门的虚拟水。

表4 社会经济系统水循环过程中虚拟水的流动情况

Table 4 Movements of virtual water in water cycle of the socio-economic system of Zhangye City

生产部门	生产		产出	分配			居民生活对外地虚拟水需求
	水资源	进口虚拟水		居民消耗	存货增量	流出	
种植业	189 038.00	315.71	147 806.61	57 496.00	4 595.79	85 714.82	548.63
畜牧业	9 328.95	924.78	20 884.11	4 114.89	5 225.90	11 543.32	1 825.75
其他农业	12 152.20	1 500.08	12 318.68	3 775.12	6 048.36	2 495.20	5 994.79
采选业	401.82	314.73	1 923.65	113.70	628.70	1 181.25	269.85
制造业	3 752.62	10 558.06	25 160.14	941.75	20 357.07	3 861.32	8 939.83
电力业	1 512.74	3 380.74	529.12	151.49	377.63	0.00	1 173.07
建筑业	501.09	1 364.52	17 357.74	2 260.65	7 877.65	7 219.43	4 495.00
运输业	120.81	281.79	2 564.59	127.72	928.82	1 508.05	193.32
服务业	605.00	996.00	8 505.00	1 209.81	5 055.70	2 239.49	1 600.89
合计	217 413.22	19 636.41	237 049.63	70 191.14	51 095.62	115 762.87	25 041.14

注:表中数值的单位为万 m³。

4 讨论和结论

虚拟水概念与战略自提出后,就以其形象的表达及其丰富的内涵,成为水资源领域的研究热点^[10]。然而,目前研究多将虚拟水战略简单理解成缺水国家或地区通过从富水国家或地区进口水资源密集型产品来保障其水资源安全,单纯强调区域的水资源禀赋,而没有将地区社会经济因素纳入考虑,导致虚拟水战略无法落实。基于虚拟水的投入产出计算方法研究了张掖市社会经济系统水循环过程,其目的就是建立区域内外虚拟水转化和流动的联系,从机理上阐明外部区域水资源密集型产品难以进入张掖市的原因。

研究表明,相对于其他各经济部门,种植业部门实体水的使用以及虚拟水的转化和流动构成了张掖市社会经济系统水循环的主体,外部地区流入张掖市的虚拟水量较少,且主要集中于制造业和电力业等水资源稀疏型产品。在产出的虚拟水中,除一部

分用于满足居民生活的消费需求和增加各经济部门虚拟水的储存需求外,相当数量的虚拟水在地区贸易中随产品和服务流出张掖市。在流出的虚拟水中,种植业部门所占的比例最大,达到全部虚拟水流量的74.0%。尽管大规模的产品生产是造成种植业部门虚拟水流出的直接原因,但从需求角度来看,张掖市社会经济系统对种植业部门产品及虚拟水较少的消费需求也是引起该部门虚拟水流出的主要原因。如表1所示,在张掖市种植业部门的产出产品中,用于本地经济生产消耗和居民生活消费的数量为96 218.96万元(已去除掉外地流入经济生产中的种植业产品),占全部产出量的61.22%。而对于甘肃省和全国来说,这个比例却分别为64.31%和91.98%^[22-23],均超过张掖市的利用水平。较低的利用水平,加之自由的地区贸易最终导致大量虚拟水随种植业产品流入其他地区。

从流动过程来看,类似于其他资源(如实体水)的运动,虚拟水的流动也是由于“流出地”与“流入

地”之间不同的资源势引发的。大规模的生产、大量的用水以及较低的产品消耗水平使得种植业部门成为一个较大的虚拟水“蓄积库”，并在张掖市及其周边地区的社会经济系统中形成较高的虚拟水“水势”。地区之间以及各经济部门之间虚拟水水势的差异使得种植业部门的虚拟水具有了运移的动能。在流向上，尽管向本地经济生产和社会生活的转化与流动以及向外地的输出都会降低种植业部门虚拟水的水势和动能，但从地区水资源利用效率来看，虚拟水在本地社会经济系统中的转化和流动能起到优化地区内水资源配置的作用，间接提高了张掖市水资源的利用效率；而虚拟水向外地的输出则会造成地区水资源的流失，直接降低了张掖市水资源的利用效率。因此，增强种植业部门产品在张掖市社会经济系统中的循环强度成为该地区降低水资源流失和提高水资源利用效率的有效手段。

理论上，上述策略的实现途径可有两种：一是降低种植业的生产规模以减少该部门水资源的使用量和虚拟水的产出量；二是加强种植业部门与其他经济部门之间的经济联系以增强经济生产对种植业产品的使用强度。在具体操作上，张掖市应充分利用好在西部生态建设中对农民投入的钱粮补贴，继续加强退耕还林(草)工程，以推动区域经济结构的战略性调整^[9]。此外，该地区还应加强扶持农产品加工工业的发展，使各农业部门生产的产品在本地区内得到最大程度的利用。只有控制好种植业部门的生产规模，并且使本地生产的农产品得到充分的利用，外地虚拟水含量较高的农产品才能有机会流入张掖市。

社会经济系统水循环是一个全新的研究领域，可借鉴的研究并不多，所以我们尝试性的研究不可避免的存在一些缺陷。首先，研究中没有涉及到生活用水和污水排放等方面的内容。尽管经济生产和社会生活在用水时都会产生污水，但其过程却相对简单，并且依据虚拟水概念，经济生产中产生的污水已经纳入到各经济部门虚拟水的核算中。因此，我们的研究主要侧重了社会经济系统水循环中较为复杂的水的转化和流动过程。其次，研究中假设外地流入产品和本地生产产品具有相同的品质，且按照本地与外地产品在中间使用中总的构成比例计算了虚拟水转化过程中两类产品的组成，这可能与实际情况有所差异。最后，研究中使用了相对过时的社会经济数据，这可能对我们的结果分析产生一定的影响，但由于投入产出表构建的复杂性，数据难以更

新是投入产出分析共同的缺陷。今后研究中，为使社会经济系统水循环过程研究获得更加科学、实用的研究成果，迫切需要从社会经济系统水循环理论的完善、基础数据的更新和实地调查以及各经济部门虚拟水在转化过程中价值变化的分析等方面开展研究工作。

参考文献(References):

- [1] Merrett S. Introduction to the economics of water resources: An international perspective[M]. London: UCL Press, 1997: 35—61.
- [2] 陈庆秋, 陈晓宏. 基于社会水循环概念的水资源管理理论探讨[J]. 地域研究与开发, 2004, 23(3): 109—113.
- [3] 陈家琦, 王浩, 杨小柳. 水资源学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1496—1502.
- [5] 贾绍凤, 王国, 夏军, 等. 社会经济系统水循环研究进展[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 255—262.
- [6] 成升魁, 沈镭, 闵庆文, 等. 资源科学研究的新视角——自然资源流动过程的研究[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 199—200.
- [7] Allan J A. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits[J]. Groundwater, 1998, 36(4): 545—546.
- [8] Hoekstra A. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[C]. Value of Water Research Report Series No. 12. Netherlands: IHE Delft, 2003.
- [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, 18(4): 260—265.
- [10] 刘宝勤, 封志明, 姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 120—127.
- [11] 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.
- [12] 张志强, 程国栋. 虚拟水、虚拟水贸易与水资源安全新战略[J]. 科技导报, 2004, 3: 7—10.
- [13] Turton A, Ohlsson L. Water scarcity and social stability: Towards a deeper understanding of key concepts needed to manage water scarcity in developing countries[C]. Occasional Paper 17. London: SOAS Water Issues Group, 1999.
- [14] 肖洪浪, 程国栋. 黑河流域水问题与水管理的初步研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 1—5.
- [15] 郭巧玲, 冯起, 司建华. 黑河流域水资源研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 855—859.
- [16] 宁宝英, 何元庆, 和献中, 等. 黑河流域水资源研究进展[J]. 中国沙漠, 2008, 11(6): 1180—1185.
- [17] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 虚拟水理论与西北4省(区)虚拟水实证研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 577—584.
- [18] Leontief W. Input-Output Economics[M]. New York: Oxford University Press, 1986.
- [19] 王勇, 肖洪浪, 陆明峰. 张掖市国民经济用水的投入产出分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1197—1201.

- [20] Toh H. The RAS approach in updating I-O matrices: An instrumental variable interpretation and analysis of structure change[J]. *Economic Systems Research*, 1998, 10(1): 63-78.
- [21] 陈东景. 环境经济综合核算的理论与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [22] 甘肃省统计局. 甘肃年鉴 2005[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2002[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2003.

Water Cycle Process Analysis and Water Volume Estimation of Socio-economic System in Zhangye City, Gansu Province

WANG Yong^{1,2}, XIAO Hong-lang², LI Cai-zhi², ZHAO Liang-ju², ZOU Song-bing², REN Juan²
(1. *Yantai Institute of Coastal Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China*; 2. *Key Laboratory of Ecohydrology and River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Based on resources flowing theory and virtual water concept, this study constructs an extended input-output model to analyze the structural relationships among economic activities in Zhangye City and their physical relationships with water resources. This model allows us to trace the transformation of various products and to calculate the level of the virtual water contents of each sector's product, thus offering the possibility of studying the water movement and transformation in a socio-economic system. It is shown that the consumption of physical water resources and the transformation and movements of virtual water in farming sectors become the main body of water cycle in the socio-economic system in the study area. The imported products are characterized by relative lower virtual water contents and the virtual water following from other regions is little. The lower consumption of farming products in the study area has caused large amounts of farming products and virtual water following out of the study area. From the view of regional sustainable development, strengthening the consumption level of farming products appear to be the practical means to reduce the export of virtual water and increase utilization rate of the limited water resources.

Keywords: physical water; virtual water; input-output; water cycle; socio-economic system