甘肃省武威市水资源利用效率动态评估

郑 晖, 王文静, 石培基, 王 红
(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 引入水资源足迹的概念,以水资源足迹的计算为基础,对武威市 1995—2009 年水资源足迹、水资源利用效率以及城乡居民虚拟水消费多样性指数等指标进行了综合评价。运用动态计量经济学的协整分析模型对水资源利用效率与其相关指标进行了动态均衡分析。结果表明,武威市水资源利用效率较低,与水资源足迹、城乡消费结构之间存在长期稳定的关系。采取相应的水资源管理措施已刻不容缓。水资源利用效率与其他指标之间是一个相互影响的动态系统,因此,在实施提高水资源利用效率措施的同时,必须考虑其水资源足迹和城乡居民消费结构变量的影响。

关键词: 水资源足迹; 水资源利用效率; 协整分析; 动态均衡分析
文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2013)03-0275-05 **中图分类号**: F323

Dynamic Evaluation of Resources Utility Efficiency for Wuwei City of Gansu Province

ZHENG Hui, WANG Wen-jing, SHI Pei-ji, WANG Hong
(*College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: A comprehensive evaluation of water footprint, water resources utility and urban and rural residents' virtual water consumption diversity index in Wuwei City from 1995 to 2009 was made based on the calculation of water footprint by introducing the concept of water footprint. A dynamic analysis of water resources utility was made according to the co-integration analysis model in dynamic econometrics. Results showed that water resources utility in Wuwei City was poor and it had a stable relationship with water resources utility, water footprint and urban and rural consumption structure. Therefore, some effective measures of water resource management must be taken as soon as possible. However, as the interaction between water use efficiency and other indexes is dynamical, people should consider the influences of water footprint and urban and rural consumption structure variables while taking the measures to improve the efficiency of water resources.

Keywords: water footprint; water resources utility; co-integration analysis; dynamic equilibrium relationship

武威市地处我国内陆腹地,南依祁连山,北接腾格里沙漠,气候干燥,降水稀少,植被稀疏,属于典型的干旱生态脆弱区。近年来,受到全球气候变化以及人类活动的影响,南部祁连山植被退化、冰川雪线退缩,北部地下水位下降、土地盐碱化、沙漠化程度加剧,水生态系统的自我调节能力和对自然灾害的抗干扰能力下降。人水矛盾日益加剧,水资源匮乏已经成为制约武威市经济发展最主要的因素。本文以武威市为例,在计算水资源足迹的基础上[1-2],对武威市 1995—2009 年水资源足迹进行综合评价,在揭示水资源足迹的动态演变趋势的基础上采用动态计量经济学的单位根检验与协整分析方法,研究水资源利用效率与人均水资源足迹、城乡消费结构之间是否保持一种长期稳定的关系,为科学评估水资源利用效率及水资源管理和决策提供参考依据[3]。

1 研究方法与数据来源

1.1 水足迹的概念及计量

水资源足迹指的是一定物质生活水平下,维持一定人群消费所需的总的水资源数量,是基于虚拟水概念基础上的一个国家或地区居民生产和服务所消耗的水资源总量[4],既包含人类生活直接消费的实体水资源和为人类提供生态系统服务的生态环境资源,也包括隐含在人类生活所必需的食物以及日用品背后

收稿日期:2012-06-05 修回日期:2012-07-20
资助项目:国家自然科学基金项目"内陆河流域城镇体系与流域空间结构相互作用的生态经济效应研究:以石羊河流域为例"(40971078)
作者简介:郑晖(1987—),女(汉族),陕西省宝鸡市人,硕士研究生,研究方向为城市与区域发展。E-mail:zhenghuisxbj@126.com。

的虚拟形态的水资源。这一概念的提出将实体水与虚拟水结合起来[5-7]。因此,一个国家或区域的水足迹总量 W_{fp} 可以表示为:

$$W_{fp}=\mathrm{WU}+\mathrm{NVWI} \tag{1}$$

式中:WU——区域内用水量;NVWI——虚拟水净进口量。用式(1)计算区域的水资源足迹需要详细的产品流入流出数据,由于本文选取的数据年份较多,市级之间的贸易数据较难获得,限制了上述方法的使用。所以,我们选择另外一种较为简单的计算方法,从产品和服务的消费量着手,将水足迹总量 W_{fp} 可以表示为:

$$W_{fp}=\mathrm{DU}+\sum_{1}^{n}P_i\times\mathrm{VWP}_i \tag{2}$$

式中:DU——生活用水量;P_i——第 i 种产品的消费量;VWP_i——第 i 种产品单位虚拟水含量。用式(2)计算时,考虑到工业产品的种类过于复杂,实际耗水量低的特点,在计算过程中通常被忽略。所以农产品及动物产品的虚拟水含量就成了本文水资源足迹计算的重点。农产品单位虚拟水含量由单位面积的产量除以作物生育期需水量获得。计算公式分别如下:

$$V_{cn}=\frac{W_{cn}}{Y_{cn}}=\frac{\sum\mathrm{ET}_a}{Y_{cn}} \tag{3}$$

式中:V_{cn}——区域 n 中作物 c 单位质量的虚拟水含量;W_{cn}——作物 c 生长总需水量;Y_{cn}——区域 n 中作物 c 的产量;ET_a——整个作物生长期内积累的蒸散量,计算公式为:

$$\mathrm{ET}_a=k_c\times\mathrm{ET}_0 \tag{4}$$

式中:k_c——作物系数;ET_0——下垫面蒸散量,由联合国粮农组织推荐的标准彭曼(Penman—Monteith)公式计算出来,其中影响 ET_0 的气候参数包括温度、相对湿度、日照时间、离地面 2 m 高处的风速以及降水量[8]。

动物产品虚拟水含量的计算包括动物生长的整个过程中饲料的虚拟水含量、饮用水、清洁用水以及加工用水等,其中动物饲料的虚拟水含量根据不同饲料作物的构成比例进行加权计算,饲料作物的虚拟水含量按照标准彭曼公式计算[9]。

1.2 水资源消费多样性指数

生态系统的多样性已经成为了生物学和生态学的研究热点之一,从进化的角度来看,经济系统和生态系统存在类质同像的现象,因此,多样性也可用于居民消费结构与水资源利用(虚拟水消费量)之间关系的研究[10]。借鉴经济系统多样性指数的研究,将虚拟水消费多样性与虚拟水消费数量关系用 Shannon—Weaver 测量[11-12]。计算公式如下:

$$H=-\sum_{i=1}^{n}\mathrm{SP}_i\ln\mathrm{SP}_i \tag{5}$$

式中:H——居民虚拟水消费的多样性;SP_i——第 i 种虚拟水占虚拟水消费总量的百分比,本文选取的居民主要消费品包括粮食、鲜菜、植物用油、猪肉、牛羊肉、鲜蛋、鱼虾、瓜果、乳类等。式(5)中 H 值越大,则表示虚拟水消费的多样性越高,而虚拟水消费多样性越高的充分条件是各种食物的虚拟水消费分配越接近平等,因此食物消费的多样性高低反映了居民消费水平的高低。

1.3 水资源利用率与水资源足迹之间的动态均衡模型

水资源利用效率是衡量一个国家或地区生态安全的重要指标,通常用水足迹强度来表示水资源利用率水平,即地区水资源足迹总量与国内生产总值(GDP)的商值,水足迹强度越大,表明单位 GDP 所消耗的水资源量越高,即水资源利用效率越低。

通过研究地区水资源利用效率与水资源足迹、城镇居民虚拟水消费多样性指数和农村居民虚拟水消费多样性指数之间的动态均衡关系来分析和预测地区水资源利用效率的动态演变趋势,对地区水资源的安全管理和决策十分重要。以往的相关及回归分析常用来反映变量之间的静态关系,而动态计量经济学的单位根检验和协整分析模型则是基于数据驱动和数据结构及规律,来研究变量间是否保持一种长期稳定的动态均衡关系[13]。所以将动态均衡模型引用到水资源研究领域,来分析水资源利用率与水资源足迹等相关指标之间是否存在一种长期稳定的关系。

1.3.1 *单位根检验模型* 协整检验与格兰杰因果检验均要求时间序列变量具有平稳特性,因此在实证检验之前先要检验时间序列的平稳性即单位根检验。若出现非平稳时间序列且存在单位根,则通过对其差分的方法来消除单位根,得到平稳序列。通常采用的单位根检验方法是 ADF(augmented Dickey—Fuller test)检验法[14],模型如下:

$$\Delta Y_t=c+\delta_t+\gamma Y_{t-1}+\sum_{i=1}^{k-1}\rho_i\Delta Y_{t-i}+\varepsilon_t \tag{6}$$

式中:Y_t——t 时间的变量值;ΔY_t——变量 Y_t 和 Y_{t-1} 的一阶差分,即 $\Delta Y_t=Y_t-Y_{t-1}$;ε_t——白噪声;c,δ,ρ——检验过程的生成条件。ADF 检验为 H_0:$\delta=0$ 表示时间序列中含有一个单位根,拒绝零假设表示时间序列非平稳,对于非平稳序列,则需对其进行 d 次差分就可成为平稳序列,则称该序列是 $I(d)$ 的。

1.3.2 *协整分析模型* 实际生活当中绝大多数时间序列本身是非平稳的,但是它们之间的某种线性组合却是平稳的,协整关系是变量之间可能存在的某种平稳的线性组合,这种线性组合反映了变量之间的长期稳定关系[15]。选用 Johansen 极大似然法对时间变

量进行协整检验。考虑一个 P 阶 VAR(vector auto regression,向量自回归)过程:

$$Y_t=A_1Y_{t-1}+\cdots+A_pY_{t-p}+BX_t+\varepsilon_t \quad (7)$$

式中:Y_t——t 维非平稳 $I(1)$序列;X_t——d 维确定性变量;ε_t——扰动变量。将式(7)变换为:

$$\nabla Y_t=\sum_{i=1}^{p-1}\Gamma_i\nabla Y_{t-i}+\prod Y_{t-1}+BX_t+\varepsilon_t \quad (8)$$

式中:∇Y_t——时间序列的差分。

其中,$\prod=\sum_{i=1}^{p}A_i-I_m$,$\Gamma_i=-\sum_{j=i+1}^{p}A_j$。

由 Granger 定理,若系数矩阵$\prod$的秩 $r<k$,则必定存在 2 个秩为 k 和 $k\times x$ 的矩阵 α,β,使得$\prod=\alpha\beta^T$且β^TY_i 平稳。r 是协整方程的个数,β 的协整向量。对系数矩阵$\prod$进行协整似然比(LR)检验,其假设检验为:H_0:至多有 r 个协整关系,H_1:有 m 个协整关系。检验的统计量轨迹 Q_r 为:

$$Q_r=-T\sum_{i=r+1}^{m}\lg(1+\lambda_i) \quad (9)$$

式中:Q_r——检验的统计量轨迹;T——观测期综述;λ_i——大小排在第 i 位的特征值。

1.4　数据来源

本文选取的指标均以水资源足迹的计算为基础。在水资源足迹的计算过程中,考虑到资料的可获得性,我们选取式(2)的计算方法,从居民主要消费产品的虚拟水含量及居民生活实体水消耗量两个方面对相关资料进行搜集。数据来源包括:(1) 武威市气象站、民勤气象站和乌鞘岭气象站的相关气象数据及 CROPWAT 8.0 作物需水量计算软件;(2) 国际虚拟水研究成果中的中国动物产品虚拟水含量计算成果;(3) 统计资料和相关文献[16—17],如《武威市统计年鉴》、《石羊河水资源公报》等。

2　结果与分析

根据上述模型和相关数据,对武威市 1995—2009 年水资源利用效率状况进行了测算,得到了人均水资源足迹、水足迹强度、城镇居民和农村居民虚拟水消费多样性指数等衡量指标,结果如表 1 所示。

表 1　1995－2009 年武威市水资源足迹相关指标测算结果

年份	城市人均虚拟水消费量/m^3	农村人均虚拟水消费量/m^3	总水资源足迹/10^8 m^3	人均水资源足迹/m^3	水足迹强度(m^3/元)	虚拟水消费指数	
						城镇	农村
1995	802.505	775.854	14.943	819.318	0.438	2.176	1.254
1996	794.821	752.539	14.638	797.968	0.361	2.235	1.311
1997	786.680	745.591	14.589	791.539	0.310	2.270	1.384
1998	776.566	729.123	14.476	776.906	0.272	2.304	1.472
1999	751.044	742.505	14.709	785.989	0.250	2.345	1.512
2000	734.205	727.974	14.521	771.981	0.216	2.306	1.553
2001	727.380	680.020	13.826	730.637	0.188	2.347	1.629
2002	769.942	735.377	14.787	784.642	0.177	2.401	1.678
2003	835.439	699.514	14.430	763.416	0.145	2.302	1.646
2004	821.570	729.712	15.056	796.162	0.123	2.355	1.769
2005	820.459	765.533	15.547	820.873	0.122	2.368	1.763
2006	848.917	772.671	15.731	830.043	0.113	2.320	1.790
2007	818.185	759.753	15.493	814.717	0.098	2.347	1.799
2008	800.929	749.833	15.404	805.920	0.088	2.400	1.877
2009	851.134	772.728	16.032	835.738	0.083	2.414	1.909

注:由于缺少武威市农村居民的详细消费数据,本文采用武威市农村居民与甘肃省农村居民的生活消费总支出的比值分别乘以甘肃省农村居民各项消费品的数量计算出武威市农村居民的消费情况。

2.1　水足迹的变化特征

武威市全社会水资源足迹总量稳定在 1.49×10^9～1.63×10^9 m^3/a,总体呈现出缓慢上升的趋势。造成这种变化的主要原因是人口的增长以及人均水资源足迹的增加。武威市人口从 1995 年的 182.390 万人增长到 2009 年的 191.830 万人,15 a 间人口增长 9.440 万。人均水资源足迹从 1995 年的 819.318 m^3 增加到 2009 年的 835.738 m^3,15 a 间增加了16.420 m^3,亦呈缓慢增长的趋势,其增长的根本原因是人均消费性支出的增加而伴随的虚拟水消费量的增加。

2.2　水资源利用效率变化特征

水足迹强度指标用来反映地区水资源利用效率,由区域内水足迹总量除以国内生产总值(GDP)得到,水足迹强度越大,说明单位 GDP 水足迹的消耗量越高。武威市水足迹强度由 1995 年的 0.438 m^3/元下降到 2009 年的 0.083 m^3/元,降幅为 81.05%,呈明

显下降趋势。说明武威市水资源利用效率有了明显的提高，但由于武威市资源禀赋较差，经济发展水平较低，水资源利用效率与全国平均水平相比仍有一定的差距。

2.3 居民虚拟水消费变化特征

如表 1 所示，从纵向来看，城镇居民和农村居民在虚拟水消费的数量上略有上升且各具特点，但从总体上看呈现出先减小，后增加的趋势。统计结果表明：1995—2001 年武威市人民生活水平有了一定的提高，使得城镇居民与农村居民对虚拟水含量较高的粮食作物的消费量减少，人均虚拟水消费量分别下降 9.36%与 12.35%。而后的 2002—2009 年人民生活水平有了进一步的提高，居民对粮食消费的下降率小于前些年，但对食用油、肉、蛋、禽及奶类等食品的消费量有所增加，从而使得虚拟水消费量缓慢增加，增幅分别为 10.55%与 5.08%，城乡居民虚拟水消费量逐渐拉大。从横向来看，城镇居民虚拟水消费量明显高于农村居民虚拟水消费量，平均每年比农村居民高出 53.40 m^3，主要原因是农村居民人均工业品及加工类食品的虚拟水消费水平和实体水的消费水平低于城镇居民。

2.4 虚拟水消费指数变化特征

Ulanowicz[18] 认为多样性与发展能力有关。武威市 1995—2009 年城镇居民与农村居民虚拟水消费多样性指数均呈上升的趋势（除个别年份出现反常）。随着居民消费性支出的增加和消费观念的改变，居民对作物类产品的虚拟水消费量降低，而对动物类产品和副食类产品的消费量增加，使得居民饮食单一化的结构得到改善，消费品呈分散化趋势发展。将城镇居民与农村居民虚拟水消费多样性指数相比较，武威市城镇居民虚拟水消费多样性指数明显高于农村居民，其增长趋势较为稳定，15 a 间增幅为 10.94%。这是因为在本文研究的起始年份，城镇居民虚拟水消费多样性相对于农村居民已处于较高水平，作物类产品的虚拟水消耗量在 15 a 间呈缓慢减少的趋势，其他产品的虚拟水消费不论从种类上还是从所占的比例上变化都不大。而农村居民由于长期收入偏低，导致起始年份对作物类产品虚拟水的消耗量偏高，但随着农村居民消费性支出的增加和消费观念的改变，农村居民的消费结构得到了很大的改善，占总消费量比例最大的作物类产品的消费呈现较快的下降趋势，食用油、肉、蛋、奶及副食等产品的消费从数量上和种类上都有了一定的增加，从而使得农村居民虚拟水消费指数有了较快的增长，15 a 间增加了 0.655，涨幅为 52.23%。

2.5 水资源足迹利用效率的平稳性检验

分析中选用的动态分析变量包括人均水资源足迹、水足迹强度、城镇居民虚拟水消费多样性指数与农村居民虚拟水消费多样性指数。由表 1 可知，所选取的变量均有上升或下降的趋势，说明所选序列都是非平稳时间序列，如果直接对其进行回归分析，结果就可能产生伪回归。所以在检验变量之间是否存在协整关系之前，必须对时间序列的平稳性进行检验。本文采用单位根检验（ADF）法，结合 Eviews 6.0，得出检验结果如表 2 所示。

表 2 时间序列变量的 ADF 检验

变量名称	检验统计量	5%临界值	结 论
水资源强度	−1.834	−3.829	非平稳
人均水足迹	−0.947	−3.120	非平稳
城镇居民多样性指数	−2.832	−3.829	非平稳
农村居民多样性指数	−2.234	−3.829	非平稳
水资源强度二阶差分	−4.254	−3.933	平 稳
人均水足迹二阶差分	−4.206	−3.175	平 稳
城镇居民多样性指数二阶差分	−8.861	−3.933	平 稳
农村居民多样性指数二阶差分	−5.285	−3.933	平 稳

从表 2 可以看出，水资源强度、人均水资源足迹、城镇居民虚拟水消费多样性指数和农村居民虚拟水消费多样性指数的检验统计量均比显著性水平为 5%的临界值大，说明所选时间序列均为非平稳序列，因此分别对其差分，再进行单位根检验。结果发现，经过二阶差分后的时间序列在 5%的显著性水平下均为平稳序列，原序列存在单位根，即所选序列存在二阶单整，记为 $I(2)$，符合 Johansen 协整检验的条件。

2.6 水资源足迹利用效率的协整检验

通过上述平稳性检验，可知水资源强度、人均水资源足迹、城镇与农村居民虚拟水消费多样性均为单位根过程，可以通过协整检验来判断它们之间是否存在长期稳定的均衡关系。协整检验的结果如表 3 所示。

表 3 1995−2003 年武威市水资源利用效率的 Johansen 协整检验结果

变量名称	协整方程个数假定	特征值	T 统计量	5%临界值
水资源强度与水足迹	无	0.668 4**	22.809 7	18.397 7
	至多一个	0.408 8	7.357 6	3.841 5
水资源强度与城镇居民多样性指数	无	0.926 7**	45.391 3	15.495 0
	至多一个	0.467 1	8.811 2	3.841 5
水资源强度与农村居民多样性指数	无	0.854 6**	34.810 8	15.494 7
	至多一个	0.427 9	7.819 1	3.841 5

注：** 表示在 5%的显著水平上拒绝原假设。

表 3 列出了最大特征值统计量和 T 统计量，表明在 5%的显著水平下水资源强度与人均水足迹、城镇居民虚拟水消费多样性指数和农村居民虚拟水消费多样性指数之间只存在一个协整关系。换句话说，水资源强度与人均水足迹、城镇和农村居民虚拟水消费多样性指数之间存在着长期稳定的关系。

3 结 论

本文采用虚拟水的计算方法，对武威市 1995—2009 年城乡居民的水资源足迹进行了测算，分析了武威市 15 a 间人均水资源足迹的变化趋势与水资源利用效率的变化特征（本文以居民生活消费品中主要农产品的计算为主，由于工业产品的种类太多与生产过程过于复杂且用水量低的原因，故没有计算在内，所以本文水资源足迹的计算只是一种粗略保守的估计）。在此基础上结合多样性指数的概念，对城镇居民与农村居民虚拟水消费多样性指数进行了测算，分析城镇居民与农村居民虚拟水消费的特征。结果表明，武威市人均水足迹从 1995 年的 819.318 m^3 增加到 2009 年的 835.738 m^3，呈现小幅度增长。水足迹强度由 1995 年的 0.438 下降到 2009 年内的 0.083，减幅 81.05%。城镇居民与农村居民虚拟水消费多样性指数分别由 1995 年的 2.176 与 1.254 增加到 2009 年的 2.414 与 1.909，增幅分别为 10.94% 与 52.23%。在除去人口因素的影响下，随着武威市水资源利用效率的提高，人均水足迹未见较高的增长，说明水资源利用效率的提高对缓解武威市的水资源压力有一定的促进作用。

本文将水足迹理论和动态计量经济学的方法结合起来，对武威市水资源利用效率与水资源足迹、城乡居民消费结构进行了定量计算和动态均衡分析。通过分析得出，武威市水资源利用效率、人均水足迹与城乡居民虚拟水消费指数都是非平稳的，其水资源利用效率与其他三者之间均存在长期的均衡关系。换句话说，武威市水资源利用效率较低与人均水资源足迹、城乡消费结构的这种不协调趋势将长期存在。由于水资源利用效率与其他指标之间是一个相互影响的动态系统，因此在实施提高水资源利用效率措施的同时，必须要将水资源足迹和城乡居民消费结构变量的影响考虑进去。

[参 考 文 献]

[1] 龙爱华，张志强，徐中民，等. 甘肃省水资源足迹与消费模式分析[J]. 水科学进展，2005，16(3)：418-425.

[2] 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.

[3] 张燕，徐建华，吕光辉. 西北干旱区新疆水资源足迹及利用效率动态评估[J]. 中国沙漠，2008，28(4)：775-780.

[4] Allan J A. Virtual water：A Long-term Solution for Water Short Middle Eastern Economies [M]. British University of Leeds Press，1997：519-520.

[5] Allan J A. The political economy of water：reasons for optimism but long-term caution[C]// Allan J A. Water，Peace and the Middle East：Negotiating Resources in the Jordan Basin. Tauris Academic Studies，London，1996.

[6] Hoekstra A Y. Virtual water trade：an introduction [C]// Hoekstra A Y. Virtual Water Trade：Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual water trade，Value of Water Research Report Series No 12. IHE DELFT，2003.

[7] Long Aihua，Xu Zhongmin，Shang Haiyang. Impacts of population，affluence and technology on water footprint in China[J]. Acta Ecological Sinica，2006，26(10)：3358-3365.

[8] 王新华，徐中民，龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. 冰川冻土，2005，27(3)：774-780.

[9] 龙爱华，徐中民，张志强，等. 甘肃省 2000 年水资源足迹的初步估算[J]. 资源科学，2005，27(3)：123-129.

[10] 苏芳，徐中民. 张掖甘州区农村居民不同收入群体家庭虚拟水消费比较[J]. 冰川冻土，2008，30(5)：883-889.

[11] Xu Zhongmin，Cheng Guodong，Chen Dongjin，et al. Economic diversity，development capacity and sustainable development of China [J]. Ecological Economics，2002，40(3)：369-378.

[12] Xu Zhongmin，Zhang Zhiqiang，Cheng Guodong. Ecological Economics：Principles and Applications [M]. Zhengzhou：Yellow River Conservancy Press，2003：901-921.

[13] Granger C W J. Investigation causal relations by econometric models and cross spectral methods [J]. Econometrical，1969，37(3)：424-438.

[14] Dickey D A，Fuller W A. Distribution of the estimations for autoregressive time series with a unit root [J]. Journal of the American Statistical Association，1979，74(6)：427-431.

[15] 吴林海，杜文献. 中国 R&D 投入与经济增长的关系：基于 1991—1995 年间中国科技统计数据的协整分析[J]. 科学管理研究，2008，26(2)：89-100.

[16] 武威市统计局. 武威市统计年鉴 1995—2009[M]. 北京：中国统计出版社，1995—2009.

[17] 甘肃省水利厅. 石羊河水资源公报 1995—2009[M]. 兰州：中国水利水电出版社，1995—2009.

[18] Ulanowicz R E. Growth and Development. Ecosystems Phenomenology [M]. New York：Springer-Verlag，1986.